



Université du Québec  
à Rimouski

**INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE ET  
MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE  
TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL PAR LASER  
AVEC DIFFÉRENTS MODÈLES DE BALAYAGE**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

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

PAR

© BAHA TARCHOUN

**Juin 2020**



**Composition du jury :**

**Mohammed Bahoura, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

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

**Ahmed Chebak, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Mohamed Yasser Hayyani, examinateur externe, Université d'Alep**

Dépôt initial le 30 avril 2020

Dépôt final le 25 juin 2020



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 et mes proches





## **REMERCIEMENTS**

En premier lieu, je voudrais remercier le professeur Abderrazak El Ouafi, directeur de ce projet de recherche, pour son support indéfectible, ses idées créatives et ses conseils judicieux pour orienter le développement du projet ainsi que pour son temps investi dans la correction de la totalité de mes travaux.

Je tiens à remercier également le professeur Chebak Ahmed, codirecteur de ce projet, pour son appui inexprimable, ses discussions constructives, l'inspiration et le temps qu'il a bien voulu me consacrer pour élaborer ce projet.

Je tiens à remercier énormément mes parents, ma fiancée, mes frères et toute ma famille pour leurs soutiens et leurs précieux encouragements même à distance.

Je n'oublie pas mes chers amis qui sont partout dans le monde et mes collègues avec qui j'ai eu l'occasion de travailler et de partager des bons moments.



## **AVANT-PROPOS**

Ce projet de recherche a été mené au sein du Laboratoire de Recherche en Productique (LRP) de l'Université du Québec à Rimouski. Le présent mémoire est présenté sous forme de trois articles en plus d'une introduction et d'une conclusion générales. Le premier chapitre présente une introduction générale décrivant la problématique, les objectifs et la méthodologie ainsi qu'une revue de littérature qui porte sur le procédé de traitement thermique superficiel par laser utilisant différents modèles de balayage. Les chapitres 2, 3 et 4 présentent les trois articles relatifs aux trois phases du projet. Une conclusion générale ainsi que quelques recommandations sont présentées dans le cinquième et dernier chapitre.



## RÉSUMÉ

Le traitement thermique de surface par laser représente une des solutions les plus innovantes dans l'industrie moderne grâce à ses nombreux avantages. Les recherches concernant ce procédé n'ont pas encore révélé toutes ses spécificités et ses subtilités. Cela limite fortement les possibilités d'exploiter adéquatement ses avantages et d'optimiser ses performances.

L'objectif de ce projet consiste à investiguer aussi bien expérimentalement que numériquement le procédé de traitement thermique de surface par laser dans le but de développer une stratégie d'optimisation prédictive de ses performances dans le cas de l'utilisation de différents modèles de balayage de la source laser. Cette stratégie permet de conduire à des modèles prédictifs simples, précis et robustes des performances du procédé. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie en trois phases est adoptée. La première consiste à conduire une investigation expérimentale pour analyser les effets des modèles de balayage considérés sur les caractéristiques du profile de dureté. L'expérimentation est conduite selon des plans d'expériences structurés appliqués à des plaques en acier AISI 4340 en utilisant une source laser Nd:Yag de 3 kW. L'analyse des résultats expérimentaux est réalisée à l'aide de techniques statistiques éprouvées.

La deuxième phase consiste à développer et à valider expérimentalement un modèle numérique 3D en utilisant la méthode des éléments finis afin de réduire les coûts de l'expérimentation et simuler le comportement du procédé sous des conditions difficiles à réaliser expérimentalement. Les résultats des simulations ont révélé que les modèles 3D permettent de fournir une prédiction cohérente ainsi qu'une analyse qualitative et quantitative du comportement du procédé. Cette analyse a permis d'identifier les variables et les conditions les plus pertinentes à considérer dans une modélisation prédictive.

Finalement, la troisième phase consiste à exploiter les avantages qu'offrent les réseaux de neurones artificiels dans le développement de la stratégie d'optimisation prédictive proposée. Des modèles directs et inverses du procédé ont constitué les ingrédients de base de cette stratégie. Une base de données intégrant les données provenant de l'expérimentation et les données issues des simulations numériques est utilisée pour l'apprentissage et pour la validation des modèles. De nombreux critères statistiques sont utilisés pour évaluer les performances des modèles aussi bien en termes

de précision que de robustesse. Les résultats obtenus montrent que cette stratégie conduit à des modèles prédictifs précis et robustes.

*Mots clés* : Traitement thermique de surface par laser, Acier AISI 4340, Analyse thermique, Modèles de balayage, Profil de dureté, Planification d'expériences, ANOVA, Modélisation numérique 3D, Modèle prédictif, Réseaux de neurones artificiels.

## **ABSTRACT**

Laser surface hardening represents one of the innovative solutions in modern industry thanks to its several advantages. Research has not yet revealed all its details and subtleties, which severely limits the possibility of optimizing its performance and adequately exploiting its advantages.

The objective of this project is to investigate experimentally and numerically the laser surface transformation hardening process in order to develop an integrated performance optimization strategy when using different scanning patterns. To achieve this goal, a three-phase methodology is adopted. The first phase consists in performing an experimental investigation to evaluate the effects of the hardening modes and parameters on the hardness profile characteristics. The experimentations are conducted according to structured experimental designs applied to AISI 4340 steel plates using a 3 kW Nd:Yag laser source. The experimental data analysis is carried out using improved statistical tools.

The second phase consists of developing and experimentally validating a 3D finite element method based numerical model in order to reduce the cost of experimentation and to simulate the process behaviour under conditions that are difficult to perform experimentally. Simulation results reveal that the 3D models provide a consistent prediction as well as a qualitative and quantitative analysis of the process performances. This analysis is used to identify the most relevant variables and conditions to consider in the predictive modeling and the optimisation approach.

Finally, the third step consists in exploring the advantages of artificial neural networks to develop an effective predictive optimization strategy. The proposed direct and inverse process models are based on a mixture of data collected from experimental investigations and 3D numerical simulations. A combination of statistical tools and learning procedures are used to improve the modeling procedure. The results shown that this strategy can lead to accurate and consistent predictive models.

**Keywords:** Laser Surface hardening, AISI 4340 Steel, Thermal Analysis, Hardness Profile, Scanning Patterns, Design of Experiments, ANOVA, Predictive Modeling, 3D Numerical Model, Artificial Neuron Networks.





## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
AVANT-PROPOS.....	xi
RÉSUMÉ.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
TABLE DES MATIÈRES.....	xvii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES.....	xxiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxvii
LISTE DES SYMBOLES.....	xxix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
0.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE LASER.....	2
0.2 PROCÉDÉS DE TRAITEMENT THERMIQUE PAR LASER.....	4
0.2.1 Généralités sur les aciers.....	4
0.2.2 Techniques de traitement thermique usuelles.....	6
0.2.3 Technique de traitement thermique par laser.....	11
0.3 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE.....	15
0.4 OBJECTIFS.....	18
0.5 MÉTHODOLOGIE.....	19
0.6 ORGANISATION DU MÉMOIRE.....	21
CHAPITRE 1 INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL PAR LASER AVEC DIFFÉRENTS MODÈLE DE BALAYAGE APPLIQUÉ À L'ACIER AISI 4340.....	23
1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	23

1.2	EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER SURFACE HARDENING OF AISI 4340 STEEL USING DIFFERENT LASER SCANNING PATTERNS .....	24
1.2.1	Abstract .....	24
1.2.2	Introduction .....	25
1.2.3	Experimentation .....	27
1.2.4	Results analysis and discussion .....	31
1.2.5	Conclusion .....	43
1.2.6	References .....	44
	CHAPITRE 2 INVESTIGATION NUMÉRIQUE PAR ANALYSE THERMIQUE 3D DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL PAR LASER AVEC DIFFÉRENTS MODÈLE DE BALAYAGE APPLIQUÉ À L'ACIER AISI 4340 .....	47
2.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE .....	47
2.2	NUMERICAL INVESTIGATION OF LASER SURFACE HARDENING OF AISI 4340 USING A 3D THERMAL ANALYSIS OF DIFFERENT LASER SCANNING PATTERNS .....	48
2.2.1	Abstract .....	48
2.2.2	Introduction .....	49
2.2.3	Mathematical formulation .....	51
2.2.4	Numerical simulation parameters and conditions .....	56
2.2.5	Experimental validation .....	60
2.2.6	Simulation results and discussions .....	66
2.2.7	Conclusion .....	73
2.2.8	References .....	74
	CHAPITRE 3 UNE APPROCHE D'OPTIMISATION PRÉDICTIVE DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT SUPERFICIEL PAR LASER DE L'AISI 4340 AVEC DIFFÉRENTS MODÈLES DE BALAYAGE .....	77

3.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE .....	77
3.2	AN INVESTIGATION OF PREDICTIVE OPTIMISATION APPROACH USING ANN BASED INVERSE PROCESS MODEL FOR LASER SURFACE HARDENING OF AISI 4340 USING DIFFERENT SCANNING PATTERNS .....	78
3.2.1	Abstract.....	78
3.2.2	Introduction .....	79
3.2.3	Numerical modeling .....	81
3.2.4	Numerical model validation .....	84
3.2.5	ANN based predictive modelling .....	88
3.2.6	ANN based inverse process model.....	93
3.2.7	Discussion.....	97
3.2.8	Conclusion.....	99
3.2.9	References .....	100
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	103
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	107



## LISTE DES TABLEAUX

Table 1: Chemical composition of AISI 4340 steel.....	29
Table 2: Selected parameters and their levels for experimentation .....	31
Table 3: Experimental design used for each laser scanning patterns .....	31
Table 4: Results of the repetition tests.....	32
Table 5: Experimental results achieved using the four performed L9.....	35
Table 6: ANOVA for the hardened depth and width for the four moving pattern .....	36
Table 7: Correlation analysis between laser parameters and hardened zone dimensions for the considered scanning patterns.....	38
Table 8: Regression equations derived from ANOVA for the four moving patterns.....	40
Table 9: <i>HW/HD</i> ratio for various combination of laser parameters and scanning patterns.....	42
Table 10: The parametric equations of different trajectories.....	57
Table 11: Chemical composition of AISI 4340 steel.....	57
Table 12: Physicochemical properties of AISI 4340 steel.....	57
Table 13: Simulation parameters of the three patterns .....	59
Table 14: Experimental design for testing used for each scanning pattern .....	62
Table 15: Experimental validation-results .....	62
Table 16: Comparison of the parameters contribution between experimental and simulated <i>HD</i> and <i>HW</i> for the four moving patterns .....	64
Table 17: <i>HW/HD</i> ratio for various combination of laser parameters and scanning patterns.....	73
Table 18: The parametric equations of different scanning patterns.....	82
Table 19: Simulation parameters of the four scanning patterns .....	83
Table 20: Selected parameters and their levels for simulation .....	84
Table 21: Selected parameters and their levels for experimentation .....	85
Table 22: Experimental validation results .....	86
Table 23: ANOVA analysis for the hardened depth and hardened width for the four scanning patterns.....	87
Table 24: Comparison of main errors observed between simulated and predicted <i>HD</i> and <i>HW</i> for the four moving patterns .....	88

Table 25: Comparison of ANN errors observed between real and predicted *HD* and *HW* for the four moving patterns .....91

Table 26: Summary of statistical performance estimators for the trochoid moving pattern.....97

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Processus physique du laser .....	3
Figure 2 : Diagramme de phase Fer-Carbone .....	6
Figure 3 : Courbes Jominy d'un acier type 35 CrMo 4 à l'état revenu .....	9
Figure 4 : Diagramme de transformation en chauffage continu d'un acier peu allié du type 35 CrMo 4 .....	10
Figure 5 : Procédé de traitement thermique par laser .....	12
Figure 6 : Composants de la tête laser de la cellule DMIG (UQAR) .....	14
Figure 7 : Schematic illustration of laser transformation hardening .....	28
Figure 8 : Experimental setup of steel plate's laser surface hardening using laser cell .	28
Figure 9 : Schematic illustration of the considered laser scanning patterns .....	29
Figure 10 : Cross-section of the steel plate with the variables to be measured .....	30
Figure 11 : Typical hardened zones achieved using linear scanning pattern at various laser parameters .....	32
Figure 12 : Typical hardened zones using a power of 800 W and a scanning speed of 20 mm/s for linear, sinusoidal, triangular and trochoid scanning patterns respectively.....	34
Figure 13 : Main effects of laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> for the linear moving pattern .....	36
Figure 14 : Main effects of laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> for sinusoidal moving pattern .....	37
Figure 15 : Main effects of laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> for triangular moving pattern .....	37
Figure 16 : Mains effects of laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> for trochoid moving pattern .....	37
Figure 17 : Scatter plot - Measured and predicted <i>HD</i> and <i>HW</i> for linear scanning pattern .....	39
Figure 18 : Scatter plot - Measured and predicted <i>HD</i> and <i>HW</i> for sinusoidal scanning pattern .....	39
Figure 19 : Scatter plot - Measured and predicted <i>HD</i> and <i>HW</i> for triangular scanning pattern .....	39

Figure 20 : Scatter plot - Measured and predicted <i>HD</i> and <i>HW</i> for trochoid scanning pattern.....	40
Figure 21 : Comparison of <i>HD</i> and <i>HW</i> achieved using various scanning patterns .....	41
Figure 22 : Micro-hardness measurements achieved using the considered scanning patterns (test 7) .....	41
Figure 23 : Contour plot of <i>HW/HD</i> ratio vs <i>P</i> and <i>SS</i> for (a) linear, (b) sinusoidal, (c) triangular and (d) trochoid scanning pattern .....	42
Figure 24: Illustration of the multi-track processing approach: (1) Base material, (2) Hardened zone, (3) Partial hardened zone, (4) Tempered-zone, (5) Over-tempered and partial re-hardened zone, and (6) Re-hardened zone.....	51
Figure 25: Illustration of the used laser scanning patterns: (a) Linear, (b) Sinusoidal, (c) triangular and (d) Trochoid .....	56
Figure 26: Evolution of specific heat and thermal conductivity as a function of temperature.....	59
Figure 27: Illustration of the selected final mesh size.....	60
Figure 28: Effect of mesh size on the achieved results .....	60
Figure 29: The laser cell used for the experimental validation .....	61
Figure 30: Typical hardened zones using a power of 800 W and a scanning speed of 20 mm/s for linear, sinusoidal, triangular and trochoid scanning patterns respectively .....	62
Figure 31: Scatter plot - Measured and simulated <i>HD</i> for the four scanning patterns....	63
Figure 32: Scatter plot - Measured and simulated <i>HW</i> for the four scanning patterns ...	63
Figure 33: Effect of the laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> variations for linear scanning pattern.....	65
Figure 34: Effect of the laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> variations for sinusoidal scanning pattern.....	65
Figure 35: Effect of the laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> variations for triangular scanning pattern.....	66
Figure 36: Effect of the laser parameters on <i>HD</i> and <i>HW</i> variations for trochoid scanning pattern.....	67
Figure 37: Typical isothermal contours for sinusoidal pattern .....	68
Figure 38: Typical surface temperature evaluation for different scanning patterns at (a) $x = 5\text{mm}$ , (b) $x = 30\text{ mm}$ and (c) $x = 55\text{ mm}$ .....	69



Figure 39: Temperature distribution on the heat-treated surface for different patterns (a) Linear, (b) Sinusoidal, (c) Triangular and (d) Trochoid .....	70
Figure 40: Contour plots representing the temperature distribution for different laser scanning patterns (a) Linear, (b) Sinusoidal, (c) Triangular and (d) Trochoid.....	72
Figure 41: Experimental setup of steel plate's laser surface hardening using laser cell	85
Figure 42: Typical temperature distribution during simulations - Case of sinusoidal pattern at 800 W for $P$ and 20 mm/s for $SS$ .....	86
Figure 43: ANN direct model architecture .....	89
Figure 44: Scatter plot - Real and ANN predicted $HD$ and $HW$ for linear moving pattern .....	92
Figure 45: Scatter plot - Real and ANN predicted $HD$ and $HW$ for sinusoidal moving pattern .....	92
Figure 46: Scatter plot - Real and ANN predicted $HD$ and $HW$ for triangular moving pattern .....	92
Figure 47: Scatter plot - Real and predicted $HD$ and $HW$ for trochoid moving pattern .	93
Figure 48: Block diagram of inverse process model based optimization strategy .....	95
Figure 49: Architecture of the inverse process model .....	96
Figure 50: Scatter plot - Actual and predicted $SS$ and $P$ at the training step for the trochoid pattern .....	98
Figure 51: Scatter plot - Actual and predicted $SS$ and $P$ at the validation step for the trochoid pattern .....	98
Figure 52: Scatter plot - Actual and predicted $SS$ and $P$ at the experimental validation step for the trochoid pattern .....	99



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>3D</b>	Three-dimensional.
<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute.
<b>ANN</b>	Artificial neural network.
<b>ANOVA</b>	Analyse of variance.
<b>AO</b>	Orthogonal array.
<b>F-value</b>	Fisher test.
<b>HD</b>	Hardened depth.
<b>HW</b>	Hardened width.
<b>MAE</b>	Mean absolute error.
<b>MLP</b>	Multilayer Perceptron.
<b>MRE</b>	Maximum relative error.
<b>MSE</b>	Mean square error.
<b>RMSE</b>	Root mean square error.
<b>MAPE</b>	Mean absolute percentage error.
<b>RBF</b>	Radial basis function.
<b>TSE</b>	Total square error.
<b>UQAR</b>	Université de Québec à Rimouski.
<b>DMIG</b>	Département de Mathématique, d'Informatique et de Génie.



## LISTE DES SYMBOLES

$\lambda$	Thermal conductivity steel.
$\rho$	Density.
$\varepsilon$	Emissivity of material surface.
$\gamma$	Thermal diffusivity.
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant.
$\mu\text{m}$	Micrometer.
$^{\circ}\text{C}$	Degree Celsius.
$\Delta t$	Time step.
<b>Amp</b>	Amplitude
<b>Ac</b>	Absorption coefficient.
<b>Ac1</b>	Temperature of the beginning of the transformation of Perlite into Austenite.
<b>Ac3</b>	Temperature of the end of the transformation of Perlite into Austenite.
<b>b</b>	Correction coefficient.
<b>C</b>	Carbone.
<b>Cp</b>	Specific heat.
<b>Cr</b>	Chrome.
<b>D<sub>0</sub></b>	Pre-exponential for the carbon diffusion.
<b>d</b>	Distance between the circle centre and the point of the trochoid pattern.
<b>Fr</b>	Frequency.
<b>H</b>	Initial hardness.
<b>HRC</b>	Rockwell hardness.
<b>HV</b>	Vickers hardness.
<b>P</b>	Laser power.
<b>Q</b>	Activation energy for carbon diffusion in ferrite.
<b>R</b>	Gas constant.

<b>R<sub>c</sub></b>	Reflection coefficient
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient of determination.
<b>SS</b>	Scanning speed.
<b>T</b>	Temperature of the material.
<b>T<sub>amb</sub></b>	Ambient air temperature.
<b>T<sub>f</sub></b>	Melting temperature.
<b>T<sub>max</sub></b>	Maximum temperature.
<b>t</b>	Time
<b>W</b>	Watt.

## INTRODUCTION GENERALE

Pour améliorer les caractéristiques métallurgiques et chimiques des pièces mécaniques, plusieurs procédés de traitement ont été utilisés dans l'industrie et d'autres demeurent toujours en état de développement et d'amélioration continue. Parmi toutes ces techniques, les procédés de traitement thermiques en surface sont devenus les plus utilisés grâce à leur rapidité et efficacité par rapport aux autres modes de traitement. Par l'avantage d'appliquer des apports thermiques concentrés, précis et rapides, le traitement thermique superficiel au laser permet d'améliorer la résistance à l'usure, à la rupture et à la fatigue en traitant des zones superficielles bien déterminées et sans modifier les caractéristiques du cœur de la pièce traitée. En outre, cette technique de durcissement offre plusieurs autres avantages comme la précision des zones transformées, la minimisation des risques de destructions et de déformations indésirables des pièces traitées, l'application des cycles thermiques très rapides pour obtenir une trempe autogène, le traitement approprié pour les pièces à géométrie complexe grâce à l'utilisation des robots et l'obtention d'excellents états de surfaces qui ne nécessitent pas ou peu des reprises d'usinage. En effet, les caractéristiques obtenues de la surface durcie dépendent essentiellement des différents paramètres laser et des propriétés physicochimiques du matériau à traiter.

L'optimisation et le contrôle efficace du procédé de traitement thermique superficiel au laser ne peuvent se faire que par une meilleure compréhension de son mode de fonctionnement, du comportement de matériau face à ce type de traitement et surtout des effets de ses différents paramètres tels que le type de trajectoire utilisé, la puissance laser et la vitesse de déplacement du faisceau laser. Dans ce cadre, ce mémoire présente une analyse numérique et expérimentale du traitement thermique en utilisant différents patrons de déplacement du faisceau laser appliqués à des pièces mécaniques fabriquées en acier AISI 4340. L'étude permet, à la fois, d'analyser la distribution de la température, la profondeur et la largeur durcie obtenues par chaque patron utilisé et d'évaluer les effets des principaux paramètres, ce qui aide à l'optimisation de cette méthode de traitement thermique et l'élaboration des modèles de simulation et de prédiction rigoureux.

## 0.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE LASER

Le mot LASER est l'acronyme de l'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement ou en anglais «**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation». C'est un système photonique basé sur l'effet laser qui permet la production d'un rayonnement lumineux spatialement et temporellement cohérent (Laffitte, 1987). Au début de son invention, ce phénomène était appelé maser optique, et puisqu'il était différent de la lumière ordinaire, le rayon produit peut être identifié rapidement, car c'est un faisceau de lumière cohérente. Cette lumière se diffère de celle émise par les lampes classiques comme les lampes à incandescence, les tubes fluorescents et les diodes électroluminescentes qui émettent leur lumière dans toutes les directions afin de pouvoir éclairer une pièce, un endroit ou une région de l'espace (Ion et John, 2005; Laffitte, 1987).

Le faisceau créé par un laser est très fin et il se caractérise par une tache ponctuelle et brillante s'il croise un obstacle tel qu'une feuille ou un mur. Mais, s'il se propage dans l'espace indépendamment de la distance, ce faisceau garde sa cohérence spatiale et demeure parfaitement parallèle et localisé. Avec une couleur pure, ce rayon peut être visible ou non dépendamment du type de laser. Généralement, la propriété de la cohérence temporelle du rayon laser qui est due aux champs électromagnétiques émis par le laser, permet de différencier ce faisceau, c'est-à-dire, il ne peut être composé que de certaines longueurs d'onde particulières ou quasi-monochromatiques (Billaud, 2016; Laffitte, 1987). La lumière émise est caractérisée généralement par la fréquence, la polarisation et la direction de propagation ce qui identifie en matière de photons les modes de champs. Les photons d'un faisceau laser peuvent appartenir alors à un seul mode de champ ou à un nombre réduit de modes (Laffitte, 1987).

L'introduction du concept de quantification de la matière et surtout les principes physiques décrivant l'interaction entre l'atome et la lumière, permettent une meilleure compréhension de ce phénomène. La figure 1 illustre le processus fondamental de la formation du rayon laser. Globalement, ce processus se compose de plusieurs principes notamment le principe d'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Le principe d'absorption caractérise le passage de l'atome d'un état appelé, par exemple, « $n$ » à un état « $n'$ » qui est supérieur à l'état précédent, en prélevant l'énergie correspondante sur le rayonnement, lorsqu'il est exposé à un rayonnement électromagnétique comme la



lumière par exemple. Autrement dit, l'absorption d'un photon du rayonnement (d'énergie  $h\omega = h\nu$ , où  $\omega$  est la fréquence du rayonnement,  $\nu$  est la fréquence du photon et  $h$  est la constante de Planck) fait passer l'atome du niveau d'énergie  $E_n$  vers le niveau d'énergie  $E_{n'}$ . Par contre, le principe de l'émission spontanée caractérise un atome dans un état excité «  $n'$  » qui se désexcite vers un état «  $n$  », en émettant un photon de même longueur d'onde que celui déjà absorbé auparavant avec une phase et une direction aléatoires. En ce qui concerne le principe de l'émission stimulée, un atome dans l'état «  $n'$  » peut se désexciter vers le niveau «  $n$  » sous l'effet d'une onde électromagnétique, en émettant un photon avec la même phase et dans la même direction que le photon incident. En fin de compte, le photon émis s'ajoute au rayonnement global et l'amplifie (Ion et John, 2005; Laffitte, 1987).

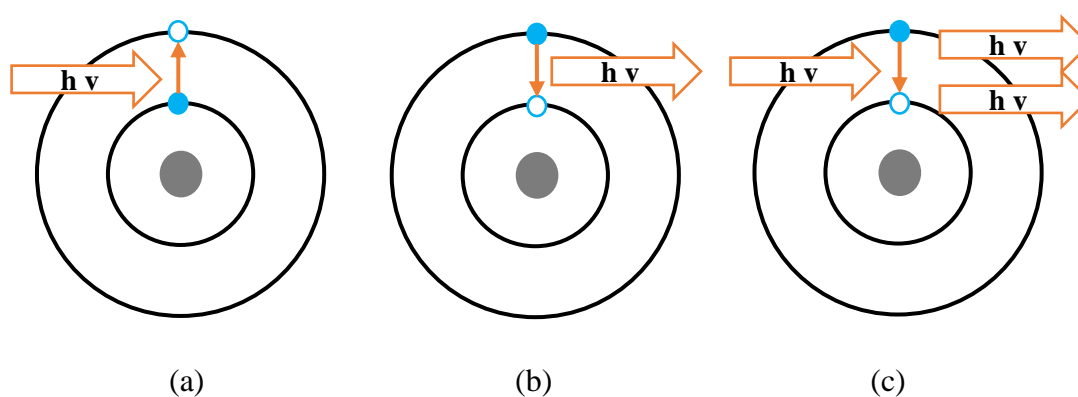


Figure 1 : Processus physique du laser

La réalisation d'un amplificateur optique exige l'existence d'une solution permettant d'exciter les atomes vers l'état d'énergie supérieure «  $n'$  » comme illustré dans la figure 1 (a). Principalement, si certains atomes sont dans l'état fondamental inférieur «  $n$  », des photons peuvent être également absorbés, ce qui diminue l'intensité du champ. Donc, l'amplification ne se produit que si les atomes sont plus nombreux à être dans l'état supérieur «  $n'$  » où ils sont capables d'émettre (figure 1 (b et c)) que dans l'état inférieur «  $n$  » où ils sont capables juste d'absorber. Ce phénomène est indispensable dans le fonctionnement du laser, et il est connu aussi sous le nom « inversion de population » (Billaud, 2016; Laffitte, 1987).

Sur le marché actuel, plusieurs types de lasers sont offerts, ce qui rend possible de les classer grâce à leurs points communs, comme la méthode d'amplification, le domaine de longueur d'onde couvert ou les domaines d'application. Parmi ces sortes de

lasers, on trouve les lasers à gaz, à fibre, à vapeur métallique, à semi-conducteur, solides, etc. (Storrie-Lombardi, *et al.*, 2001).

## **0.2 PROCÉDÉS DE TRAITEMENT THERMIQUE PAR LASER**

### **0.2.1 Généralités sur les aciers**

Composé principalement de fer et de carbone, l'acier est un alliage métallique contenant des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone. En fait, cette teneur en carbone est essentiellement le facteur qui donne à cet alliage les propriétés spécifiques du métal portant le nom « acier ». En outre, il y a plusieurs autres métaux à base de fer qui existent, mais ils ne portent pas le même nom, comme les fontes et les ferroalliages (Murry, 1993). L'acier est un alliage développé pour résister généralement à des sollicitations mécaniques comme l'usure et les déformations indésirables par exemple, ou à des sollicitations chimiques, ou parfois une combinaison des deux. L'amélioration de la composition chimique de cet alliage, se fait généralement par l'ajout à sa composition des éléments chimiques, appelés aussi des éléments d'additions, ce qui améliore sa résistance et ses performances en plus du carbone selon le domaine d'utilisation. Parmi les principaux éléments, on trouve par exemple : le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo) (Josee, 2008).

Les aciers peuvent être classés, alors, selon leur composition chimique ce qui permet de distinguer leurs domaines d'emploi appropriés. Les principales familles d'acier exploité par l'industrie sont (Murry, 1993):

- Les aciers d'usage général et qui sont généralement les moins chers.
- Les aciers non alliés qui contiennent principalement une teneur en carbone entre 0.4 % et 1.4 %. Donc, ils ne se composent que de fer et de carbone.
- Les aciers inoxydables qui contiennent une teneur en chrome de 12% au minimum en plus du fer et du carbone.
- Les aciers alliés qui sont des aciers non alliés, auxquels on ajoute d'autres éléments d'additions pour améliorer leur structure chimique. Si la quantité maximale des éléments d'alliage ne dépasse pas 5%, le mélange est considéré comme un acier faiblement allié, sinon, il est considéré comme un acier fortement allié.

Dépendamment de sa composition chimique et des traitements thermiques effectués là-dessus, la densité de l'acier varie autour de celle du fer (7,32 à 7,86) qui représente l'élément de base de ce mélange. À titre d'exemple, la densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de sa structure cristalline. Or, la densité d'un acier inoxydable du type AISI 304 (X2CrNi18-10) est d'environ 8,02 (Henry, 1970). Le coefficient de dilatation thermique de l'acier est d'environ  $11,7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ . De plus, tous les aciers ont un module de Young d'environ 200 GPa indépendamment de leur composition. Par contre, les autres caractéristiques mécaniques sont énormément affectées par la structure cristalline, les traitements thermomécaniques et les traitements chimiques appliqués là-dessus (Henry et Philibert, 1970). Ces traitements thermomécaniques sont globalement le résultat de l'association d'un traitement thermique, sous la forme d'un ou de plusieurs cycles de chauffage-refroidissement, comme par exemple, le cas de la trempe ou le revenu, et d'un traitement mécanique sous la forme d'une déformation provoquant l'érouissage comme par exemple le laminage, forgeage, tréfilage, etc.

Pratiquement, les propriétés mécaniques d'un acier sont déterminées grâce à sa teneur en carbone. Cette teneur permet également de distinguer les aciers doux (C22) et les aciers mi-durs (C35 et C45). La soudabilité d'un métal, par exemple, est affectée fortement par cette teneur, car un taux de carbone supérieur à 0.40% nécessite de prendre des précautions. Autrement dit, plus un acier a du carbone, plus il est dur et plus son degré de soudabilité baisse (Murry, 1993). L'acier AISI 4340 est un acier qui se compose d'environ 0.43% de carbone, ce qui le classe parmi les aciers hypo-eutectoïdes et le rend fortement recommandé pour la fabrication des pièces qui résistent à l'usure et à la fatigue. En effet, sa phase ferrite ( $\alpha$ ) comporte une structure cristallographique cubique centrée, tandis que sa phase austénite ( $\gamma$ ) comporte une structure cubique à faces centrées (Philibert, *et al.*, 1999). Pour comprendre le mécanisme de formation et de passage d'une phase cristalline à une autre, la figure 2, qui est inspirée de l'article de Murry (Murry, 1993), représente le diagramme de phase Fer-Carbone et les différentes transformations possibles pour les matériaux en fonction de la teneur en carbone et de la température. Pour durcir un matériau, il faut l'amener à la phase austénitique par chauffage, et l'acier 4340 est capable d'atteindre complètement cette phase à une température d'environ 800 °C.

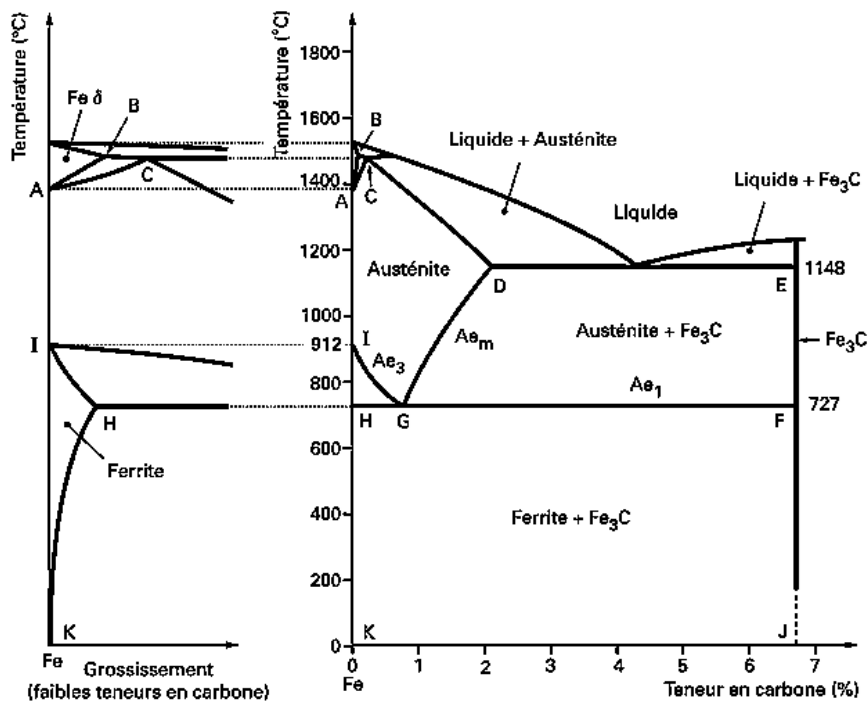


Figure 2 : Diagramme de phase Fer-Carbone (Murry, 1993)

Il y a aussi d'autres propriétés des aciers recherchées pour répondre aux besoins de l'industrie. On trouve par exemple, l'élasticité qui caractérise la capacité d'un métal à se déformer temporairement sous l'action d'un effort approprié, puis, après la suppression de cet effort, il revient à ses dimensions initiales comme dans le cas des outils tels que les scies et les marteaux (Murry, 1993). Grâce à cette propriété, ces outils sont utilisés sans être déformé de manière permanente. Le point de non-retour qui caractérise cette déformation est connue sous le nom de la limite élastique ( $R_e$ ). La plasticité d'un métal est une autre caractéristique recherchée. Elle représente la capacité de l'acier à se déformer et à conserver cette déformation comme dans le cas de fabrication des profils des gaines de ventilation. La malléabilité et la ductilité sont deux autres aspects particuliers à chercher dans certains cas, notamment, dans le cadre de l'emboutissage ou pour évaluer la réaction des aciers face aux efforts ou aux chocs répétitifs (Murry, 1993 ; Steen, 2003).

### 0.2.2 Techniques de traitement thermique usuelles

Pour améliorer les performances et les caractéristiques mécaniques d'un matériau, il doit être soumis à différentes opérations industrielles telles que les opérations mécaniques et/ou thermiques. Ces procédés peuvent être réalisés avant et/ou après

l'usinage des pièces pour obtenir les propriétés mécaniques recherchées. Au niveau industriel, la propriété la plus recherchée d'un matériau est la dureté, mais, l'amélioration d'une caractéristique engendre généralement la modification d'une autre. Autrement dit, l'augmentation de la dureté d'un métal est souvent accompagnée d'une chute au niveau de sa résilience (Ready et Farson, 2001). Cela peut paraître paradoxal, mais le fait de rendre un acier plus dur, signifie obligatoirement qu'il devient plus fragile et plus cassant. En modifiant la structure de l'acier, ces traitements modifient également les comportements du métal dans sa capacité à être usiné et soudé (Totten, 2006). Les procédés de traitement thermique par exemple, consistent à refroidir un matériau déjà chauffé et maintenu à une température qui dépasse son point de transformation. Au cours de ce processus, trois phases principales apparaissent qui ont une influence majeure sur la dureté du matériau : la perlite, la bainite et la martensite. En effet, la diffusion des atomes de carbone et le temps de cette diffusion sont les principaux phénomènes sur lesquels se base les opérations de traitement thermique (Billaud, 2016).

Lorsque la température de matériau dépasse le point d'austénisation appelé aussi  $A_{c3}$ , ses atomes de carbone résident dans les sites interstitiels de sa structure cubique à faces centrées (CFC) de l'austénite. Mais, le phénomène de refroidissement pousse ces atomes à se déplacer vers les joints de grains s'ils avaient un temps suffisant. La perlite représente la phase stable du matériau généralement constituée des lamelles superposées de cémentite et de ferrite, et créée lors de refroidissement lent du matériau à l'état austénitique. Plus l'opération de refroidissement est lente, plus les lamelles de cémentite et de ferrite constituant cette phase sont fines, plus le matériau est dur. Par contre, la phase de bainite qui contient les mêmes constituants de la perlite, est caractérisée par une structure cristalline plus fine sous forme d'aiguilles et par une dureté plus élevée. Cette phase est formée lors d'un refroidissement très rapide permettant d'obtenir la perlite mais pas assez pour avoir la martensite. Lors d'un refroidissement très rapide de l'acier austénitique, les atomes de carbone restent emprisonnés dans les sites interstitiels de la structure CFC par manque de temps de diffusion, ce qui permet d'obtenir de la martensite. Donc, ces atomes appliquent des contraintes sur la maille de la structure de matériau ce qui engendre sa déformation et le blocage de la propagation de sa dislocation. Pour cette raison, la phase martensitique est la plus dure et surtout la plus recherchée lors du processus

de durcissement des aciers (Ashby et Easterling, 1984; Mioković *et al.*, 2006; Selvan *et al.*, 1999; Steen, 2003; Tani *et al.*, 2008).

Selon les besoins industriels, les procédés de traitement thermique peuvent être appliqués en profondeur ou en surface des pièces, tout dépendamment des caractéristiques recherchées. Si cela se faisait auparavant de manière empirique et en se basant sur la méthode couteuse essai-erreur, les recherches les plus récentes ont permis d'améliorer les méthodes utilisées grâce à de nombreux modèles numériques de simulation et de prédiction développés. En effet, cela a permis de faire progresser et améliorer les résultats obtenus et surtout des connaissances déduites comme la durée de maintien de la pièce métallique à une température souhaitée et la vitesse des cycles de chauffe et de refroidissement qui modifient énormément les effets du traitement thermique (Maamri, 2015).

Ces nouvelles méthodes fournissent aussi des modèles de prédiction et des courbes caractérisées par une délimitation des plages de variation de la température et de la durée de chauffage et de maintien appropriée, tels qu'illustré dans les figures 3 et 4 inspirées de la recherche de Murry (Murry, 1993). Comme mentionné précédemment, les principaux critères qui différencient les opérations de traitement thermique sont la température de traitement, le temps de maintien et la vitesse de refroidissement. Le procédé de la trempe par exemple, consiste principalement en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé afin d'augmenter au maximum sa dureté par la formation de la martensite ou de la perlite fine en surface ou en profondeur, selon les objectifs souhaités (Altergott et Patel, 1982; Ready et Farson, 2001).

La température d'austénitisation  $A_{c3}$ , appelée aussi température de trempe, dépend essentiellement de la teneur en carbone de l'acier. De plus, elle doit être incluse dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. En fait, la trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi selon la masse de la pièce, la vitesse de refroidissement désirée et surtout en fonction de la trempabilité de l'acier qui est déterminée par l'essai Jominy (Altergott et Patel, 1982; Maamri, 2015).

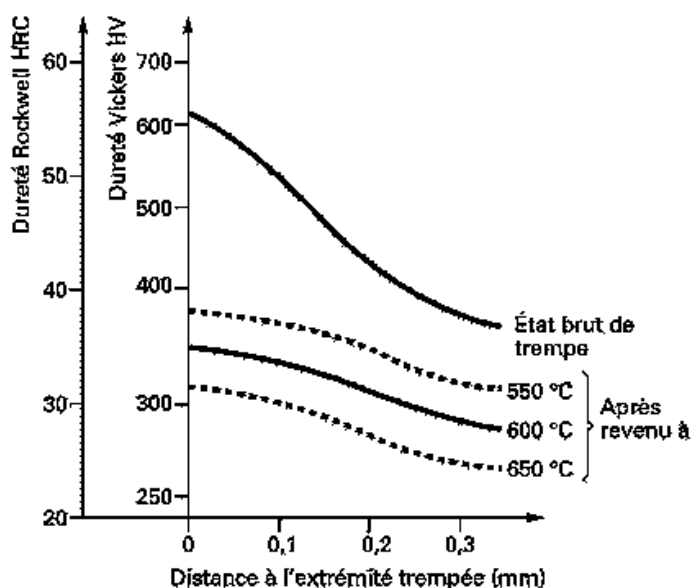


Figure 3 : Courbes Jominy d'un acier type 35 CrMo 4 à l'état revenu (Murry, 1993)

Après l'opération de trempage, l'acier obtenu devient très dur, mais aussi très fragile pour être utilisé directement, d'où l'importance d'effectuer d'autres opérations de traitement thermique telle que le revenu. L'opération de revenu consiste principalement à chauffer la pièce déjà trempée à une température inférieure au point d'austénisation, la maintenir à cette température ( $<A_{c3}$ ), puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau ou à l'huile (Philibert *et al.*, 1999). Ce procédé a comme but de minimiser les contraintes résiduelles créées par la trempe et d'augmenter aussi la ténacité. Malheureusement, la hausse de la ténacité est obtenue plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité.

La source principale des contraintes résiduelles est la grande variation de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe, d'où la naissance d'une zone appelée zone affectée thermiquement (ZAT). Cette dilatation thermique provoque aussi des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (Philibert *et al.*, 1999). En outre, il y a un autre procédé semblable au revenu qui permet l'homogénéisation et la stabilisation du matériau en l'amenant à son état d'équilibre pour faciliter son utilisation dans le plan pratique. Cette opération, appelée « recuit », consiste à appliquer un cycle de chauffe sur un métal pendant une durée bien définie et à une température située entre 500 à 900 °C, puis le

refroidir lentement ou très lentement, ce qui permet la modification de ses caractéristiques (Philibert., 1999).

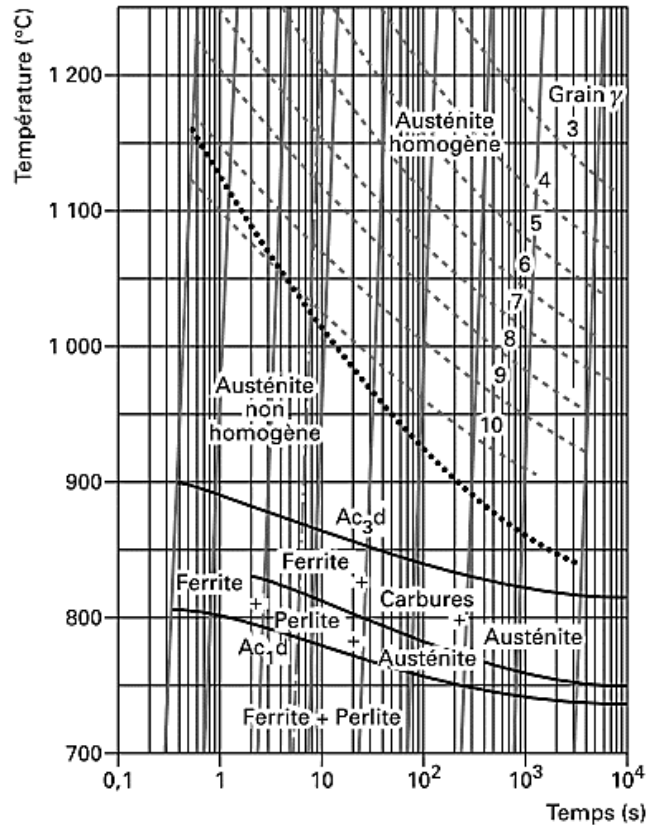


Figure 4 : Diagramme de transformation en chauffage continu d'un acier peu allié du type 35 CrMo 4 (Murry, 1993)

En ce qui concerne le traitement thermique en surface, ce procédé peut être effectué par plusieurs technologies. À titre d'exemple, les technologies les plus anciennes, s'effectuent par chalumeau ou par arc électrique, et les plus récentes utilisent le laser ou l'induction. Les anciennes techniques se caractérisent par leur simplicité, leur faible coût, leur flexibilité et la possibilité de les transporter, mais elles manquent de précision et de rapidité. Elles sont aussi difficiles à contrôler et causent généralement des problèmes environnementaux et même la qualité de surface obtenue est médiocre puisqu'elles peuvent engendrer facilement la déformation des pièces. Pour cette raison, ces techniques ne sont utilisées actuellement que pour des pièces simples et non critiques (Lévêque, 2013).

La technique de traitement thermique par induction électromagnétique consiste essentiellement à chauffer des matériaux sans avoir contact avec la source de chaleur en



utilisant l'induction des courants de Foucault dans la pièce à traiter par un champ électromagnétique. L'apport d'énergie thermique est produit grâce aux pertes Joule générées par la circulation des courants de Foucault induits dans la pièce. Ces courants sont induits dans la surface de la pièce grâce à un champ électromagnétique créé par la circulation d'un courant alternatif à haute fréquence dans un inducteur en cuivre (Lévêque, 2013). Cette technique présente plusieurs avantages comme la rapidité, un rendement élevé et une bonne qualité de la surface traitée, etc. Par contre, ce procédé exige le changement d'inducteur à chaque changement de géométrie ou de dimensions des pièces à traiter. De plus, lors du traitement, il se produit de fortes pénétrations thermiques capables de créer des distorsions thermiques dans le matériau traité (Lévêque, 2013). Puisque le procédé de traitement thermique par laser est la technique sur laquelle ce mémoire était fondé, la partie suivante sera entièrement consacrée pour détailler ce procédé.

### **0.2.3 Technique de traitement thermique par laser**

La technologie laser permet de franchir des amplitudes d'énergies très importantes par unité de surface. En effet, cette concentration permet d'atteindre très rapidement les quatre états de la matière et donc d'effectuer divers procédés d'usinage. La particularité de la trempe par laser est de pouvoir déployer, manipuler et appliquer cette énergie avec précision et de différentes façons sur une surface donnée. Puisque l'énergie optique ne pénètre pas plus que trois diamètres atomiques dans les métaux, la facilité de son transfert dans la masse de la pièce, qui s'effectue par le phénomène de la conduction thermique, dépend essentiellement des propriétés physicochimiques du matériau et de la longueur d'onde du laser utilisé (Ion et John, 2005).

La figure 5 illustre le procédé de traitement thermique par laser. Comme les autres méthodes de traitement thermique en surface, le durcissement au laser applique les mêmes cycles de chauffage, de maintien et de refroidissement de la pièce à traiter. Cependant, pour cette méthode, les zones réchauffées jusqu'au point d'auténisation se refroidissent rapidement grâce au phénomène physique de diffusion de la chaleur dans la masse de la pièce, tel que expliqué dans (Labuschage, 2006). Par conséquent, la masse de la pièce doit être relativement importante pour assurer le refroidissement nécessaire à

la transformation et l'apparition de la martensite fine dans les zones surchauffées en surface (Labuschage, 2006).

Le fait que le durcissement au laser n'exige pas un refroidissement supplémentaire dans l'eau ou l'huile comme dans les méthodes conventionnelles, il présente un autre avantage pour ce type de procédé. En outre, le laser ne produit que très peu de contraintes internes ou de distorsions dans le matériau puisque la zone affectée thermiquement est limitée par rapport aux autres procédés de traitement, et la qualité de traitement offerte est excellente et ne nécessite que peu ou pas de reprise d'usinage (De La Cruz *et al.*, 1998; Grum et Sturm, 1998).

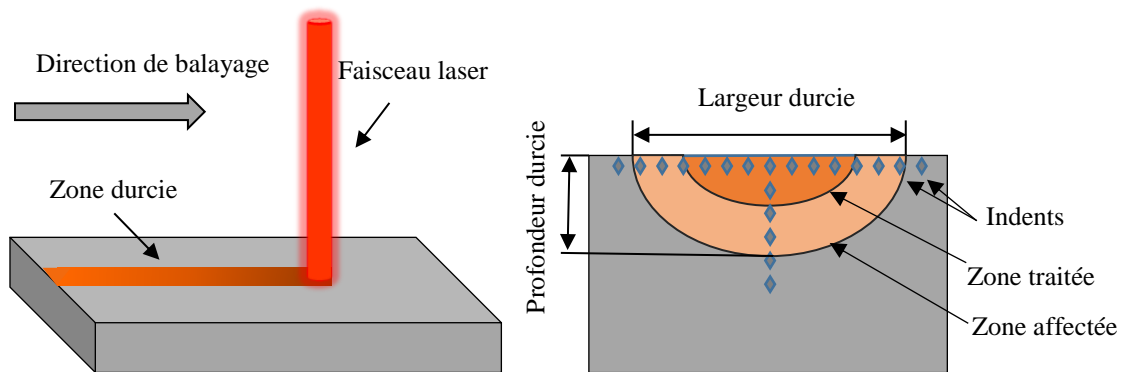


Figure 5 : Procédé de traitement thermique par laser

Le procédé de traitement thermique par laser est un procédé relativement complexe, car il fait entrer en jeu plusieurs paramètres provenant des propriétés du laser utilisé, du matériau traité, du mode de transfert énergétique et des mécanismes appliqués lors du traitement. L'irradiance et sa distribution, la taille et la géométrie de la tache focale du laser et la polarisation représentent les principaux paramètres liés au laser, tandis que les paramètres liés au matériau à traiter sont les propriétés physicochimiques, l'état de surface, la géométrie, la masse et surtout le coefficient d'absorption. En outre, les paramètres provenant des conditions de traitement sont la vitesse d'avance, le temps d'interaction, la distance focale, l'angle d'incidence et la nature du gaz de protection s'il est utilisé. En fait, l'opérateur utilisant ce procédé doit manipuler tous ces facteurs de manière à respecter la température de transformation du matériau ( $A_{c3}$ ) et le temps nécessaire pour la diffusion du carbone, tout en limitant la fusion en surface (Ashby et Easterling, 1984; Steen, 2003).

Les interactions entre les différents paramètres ont des effets considérables sur le procédé du traitement thermique et surtout sur la dureté obtenue. Par exemple, la vitesse d'avance dépend directement de l'irradiance utilisée qui prend généralement la forme de la sortie de la source laser. Un problème majeur d'une irradiance à distribution gaussienne est le fait qu'elle peut engendrer une augmentation de la température qui peut atteindre le point de fusion au centre de la tache focale, alors que la surface voisine n'atteint que la température de transformation. La résolution de ce problème peut être assurée par l'emploi d'une distribution d'énergie plus uniforme en utilisant, par exemple, des techniques de changement de forme qui sont obtenues, généralement, par l'intermédiaire des lentilles de dé-focalisation du rayon laser (Meijer et Van, 1991; Shibata *et al.*, 1992). D'autre part, la géométrie de la tache focale ainsi que la vitesse d'avance influencent l'aire de la surface durcie à chaque passage et le temps d'exposition au laser, ce qui influence donc la productivité du procédé utilisé (Meijer et Van, 1991; Shibata *et al.*, 1992). Pour les lasers à distribution gaussienne, la tache focale est délimitée par la géométrie de la zone où la puissance dépasse 13,5 % de la puissance maximale appliquée par le laser (Ready et Farson, 2001).

Par exemple, une étude menée par (Safdar *et al.*, 2006) a montré que la géométrie de la tache focale et sa disposition par rapport au déplacement influencent directement la durée des cycles de chauffage-refroidissement ainsi que la distribution de la température en profondeur et en surface de la pièce, donc elles influencent la pénétration de la chaleur dans le matériau traité. Comme il est mentionné précédemment, la vitesse d'avance et la géométrie de la tache focale délimitent le temps d'interaction, donc la durée des cycles de transformations. Les traitements effectués à des vitesses élevées produisent généralement des durcissements peu profonds et munis d'une ZAT plus petite (Caron-Guillemette, 2013). Par contre, les traitements effectués à des faibles vitesses conduisent à une grande profondeur durcie, mais peuvent diminuer la dureté en surface et engendrer même la fusion. En effet, en minimisant la vitesse, le temps d'exposition au faisceau laser augmente, ce qui engendre la diffusion du carbone et la formation d'austénite caractérisée par une grande taille après refroidissement, ce qui explique alors la diminution de la dureté en surface (Steen, 2003).

Le coefficient d'absorption est un autre facteur qui affecte énormément le procédé de traitement thermique par laser. Pour cette raison, il est nécessaire d'améliorer

l'absorptivité du matériau, soit en diminuant la réflexion de la surface ou en déposant un fin revêtement provisoire qui peut être enlevé facilement après le traitement (Steen, 2003). Ce coefficient peut être influencé par plusieurs paramètres tels que le type de matériau traité, la longueur d'onde du laser, l'état de surface et l'angle d'incidence (Ready et Farson, 2001; Steen, 2003). En effet, l'absorptivité du matériau est un phénomène très complexe puisqu'elle augmente lorsque la température augmente et peut atteindre 100% au point de fusion. Par contre, elle diminue de 40 % à 50 % en utilisant un gaz de protection qui empêche la formation d'oxyde lors du traitement (Dausinger et Jialin, 1993).

En ce qui concerne la partie équipement et sécurité du laser, utilisée dans la plupart des cellules laser disponibles sur le marché, le faisceau laser est lié à une partie du robot qui s'appelle « Tête laser » par l'intermédiaire d'une fibre optique (cf. figure 6). Cette technique permet d'éloigner la source laser de la zone de travail et, donc, éloigner le danger en plaçant la tête laser dans un environnement contrôlé et bien adapté à son fonctionnement et sa maintenance en toute sécurité.

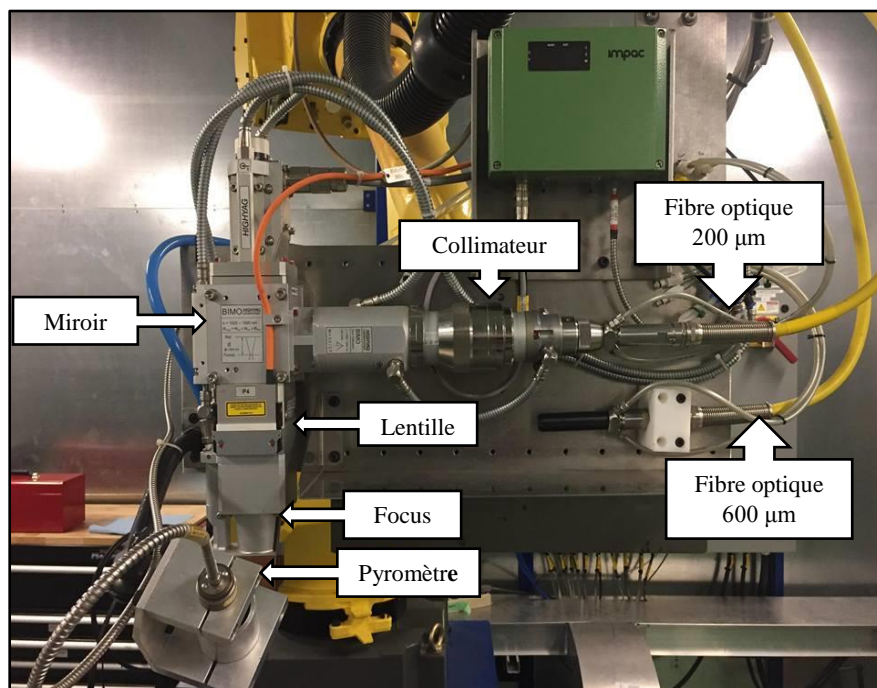


Figure 6 : Composants de la tête laser de la cellule DMIG (UQAR)

Le rôle principal de la tête laser est de manipuler le faisceau sortant de la fibre optique et de le focaliser sur une cible ponctuelle. Pour cela, elle doit être équipée par un

collimateur qui permet la rectification de ce faisceau et une lentille qui permet de le focaliser. En effet, il y a des têtes plus sophistiquées qui permettent le balayage du rayon laser selon un, deux ou même trois axes. Ces têtes comportent des miroirs montés sur des galvanomètres dont les déplacements sont contrôlés par l'intermédiaire des signaux électriques. En outre, elles sont caractérisées par des déplacements très rapides par rapport au temps de réponse de l'acier. Ainsi, la zone traitée peut être considérée comme une tache focale virtuelle unique, et il est possible de modifier la distribution de cette tâche par la modification de la vitesse des déplacements (Seifert *et al.*, 1988).

### **0.3 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE**

Les compagnies manufacturières cherchent toujours à optimiser leurs processus de production. Cela les amène à viser la minimisation des coûts de production et l'amélioration de la qualité des produits en implantant de nouvelles technologies. Dans ce cadre, grâce à ses nombreux avantages, la technologie laser prend de plus en plus de place notamment dans les domaines du soudage et du traitement thermique. Le traitement thermique superficiel par laser est l'unique procédé qui permet un traitement thermique extrêmement rapide d'une série hétérogène de pièces mécaniques avec le minimum de distorsions. Il a également l'avantage de s'intégrer facilement dans les cellules robotisées de fabrication (Ion, 2005). En outre, n'employant presque aucun gaz nocif et ne dégageant pas beaucoup d'émanation, cette technique peut être considérée comme verte. Par rapport au traitement thermique par induction, le laser reste plus efficace et plus flexible. Il permet d'éviter des problèmes tel que celui du changement d'inducteur à chaque changement de géométrie (Ion *et al.*, 2005).

Dans certaines applications industrielles, le traitement thermique implique des surfaces de dimensions dépassant de loin la taille de la tache focale qu'offrent certains types de laser. Dans de tels cas, la solution proposée par les chercheurs comme (Lakhkar *et al.*, 2008), consiste à effectuer plusieurs passages adjacents de manière à couvrir la surface à traiter. Cette solution est loin d'être satisfaisante puisqu'elle engendre des problèmes de revenu entre chacun des passages du laser en entraînant des surchauffes et une diminution importante de la dureté dans les zones surchauffées. C'est-à-dire que, lorsque le passage précédemment traité est réchauffé au-delà d'une certaine température ( $A_{c1}$ ), les mécanismes de transformation peuvent être réactivés et assurer une chute de la

dureté (Lakhkar *et al.*, 2008). Avec des capacités mécaniques et tribologiques réduites, ces zones sont des sources de problèmes pour plusieurs applications (Lakhkar *et al.*, 2008). Malgré tous ces inconvénients, ce groupe de chercheurs a pu améliorer cette méthode tout en essayant de minimiser les zones surchauffées entre les passages de durcissement où la dureté diminue. Ils ont réussi à obtenir une dureté qui varie entre 48 et 58 HRC avec une puissance laser de 850 W et ils ont découvert que la variation de dureté peut être contrôlée par l'espacement entre les pistes (Lakhkar *et al.*, 2008). Toutefois, cette méthode reste encore insatisfaisante car le nombre de passages augmente rapidement en augmentant la surface à traiter, ce qui augmente le temps de traitement et l'apport d'énergie provoquant ainsi la déformation des pièces.

D'autres chercheurs (Sistaninia *et al.*, 2009; Xue *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2011) ont proposé d'autres solutions basées sur l'idée de traiter des zones spécifiques de la surface au lieu de traiter la surface en entier en utilisant une matrice de points, une matrice de lignes et parfois des patrons de déplacement complexes tels que des trajectoires rotatives, sinusoïdales ou en zigzag. La solution proposée par (Xue *et al.*, 1999), qui consiste généralement à traiter un certain pourcentage de la surface selon une distribution uniforme (matrice de points) à l'aide d'un faisceau laser pulsé, a permis de réduire l'énergie appliquée à la pièce traitée en évitant ainsi sa déformation, mais le risque d'usure des zones non traitées précède toujours les zones traitées. En utilisant aussi cette méthode, Straffelini *et al.* (Straffelini, 2002) ont prouvé que la résistance à la traction et la résistance à l'usure augmentent à mesure que la densité de la matrice augmente. Cependant, en augmentant la densité des points, le risque de la déformation en surface de la pièce peut augmenter aussi.

En ce qui concerne la solution qui implique l'utilisation des patrons de déplacement complexes, elle permet principalement de traiter le maximum de la surface en un seul passage, d'où l'optimisation de ce procédé pour des surfaces relativement grandes. Jusqu'à présent, peu de recherches se sont concentrées sur cette méthode, bien qu'avec elle, les apports énergétiques soient énormément optimisés ainsi que le temps de traitement en proportion du pourcentage de la surface transformée. Sistaninia *et al.*, Farrahi *et al.* Ainsi que Zhou *et al.* (Farrahi, 2009; Sistaninia, 2009; Zhou, 2011) sont parmi les quelques chercheurs qui ont étudié cette méthode de traitement. Cependant, leurs efforts étaient concentrés sur le développement de modèles analytiques qui

analysent la distribution de température durant le processus de durcissement au laser par différents patrons de déplacement du faisceau laser, ce qui explique l'importance d'analyser expérimentalement l'effet de cette technique sur le profil de dureté obtenu. Globalement, Sistaninia et Farrahi (Farrahi *et al.*, 2009; Sistaninia, 2009) ont démontré que pour une puissance laser donnée, la trajectoire sinusoïdale a une distribution de température plus uniforme qu'une trajectoire circulaire. D'un autre côté, (Zhou, 2011; Tan *et al.*, 2013) ont montré qu'une augmentation de fréquence entraîne une baisse de la température maximale.

Il apparait clairement que les études faites sur cette technique de traitement par laser restent superficielles et n'offrent malheureusement pas une bonne compréhension de cette méthode afin de pouvoir la contrôler et l'optimiser. En outre, ces recherches sont toutes basées sur des modèles analytiques qui ne décrivent pas concrètement les effets de chaque trajectoire ainsi que les effets des paramètres de procédé et leurs interactions sur les caractéristiques de la pièce traitée. Quoique les connaissances et les informations sur une telle technique de traitement soient réduites, les industriels dépensent généralement beaucoup de temps et de ressources financières pour l'optimiser en utilisant des anciennes méthodes basées sur les techniques essai-erreur. D'autre part, ces techniques exigent beaucoup d'efforts pour offrir une compréhension relativement insuffisante du procédé et des phénomènes mis en jeu à cause des aspects multi-physiques et des interactions entre les paramètres qui varient énormément en fonction de la température au cours du traitement. En supposant que les caractéristiques des transformations métallurgiques en régime quasi-stationnaire sont bien connues, ces informations restent indéterminées dans le cas d'application des cycles thermiques très rapides comme ceux appliqués par le laser, car ces cycles peuvent engendrer une formation et une homogénéisation incomplète de l'austénite. Par contre, grâce à l'évolution de la modélisation numérique et de l'intelligence artificielle, ce procédé peut être bien analysé avec un minimum de coût et d'effort.

Le manque d'information et la complexité des phénomènes thermiques et métallurgiques expliquent partiellement l'absence de l'intégration de la technique de traitement superficiel au laser en utilisant différents patrons de balayage dans l'industrie manufacturière. Par conséquent, pour une utilisation adéquate des ressources qu'offre cette méthode, il faudrait mieux comprendre son mode de fonctionnement en développant

des modèles de simulation et de prédiction robustes (directs et inverses). Ces modèles permettront le dévoilement des bonnes combinaisons des paramètres, de manière à obtenir les caractéristiques mécaniques recherchées avec précision et sans recourir aux classiques, longues et coûteuses opérations. Cette investigation numérique permettra non seulement de construire une base de données exploitable, mais aussi d'élaborer des approches structurées qui serviront à optimiser et contrôler correctement ce procédé.

Les caractéristiques recherchées dans cette étude sont la température et sa distribution qui mène ultérieurement à déterminer la profondeur et la largeur durcie obtenues par chaque patron de déplacement utilisé. La simulation 3D par éléments finis représente un atout pour analyser thermiquement le procédé et évaluer le comportement du matériau face à chaque trajectoire utilisée. Cette approche de modélisation permettra aussi le développement des modèles de simulation qui assurent la résolution des équations de transfert de chaleur d'une part, et l'implantation des équations paramétriques de chaque patron de déplacement d'autre part. Puisque la modélisation par réseaux de neurones artificiels est déjà connue par sa robustesse et sa rapidité, surtout pour résoudre des problèmes non linéaires, les modèles prédictifs à élaborer doivent se reposer sur cette technique afin d'atteindre une meilleure qualité de prédiction.

#### **0.4 OBJECTIFS**

Ce projet a pour but d'investiguer expérimentalement et numériquement le procédé de traitement thermique de surface par laser appliqué sur des plaques en acier AISI 4340 dans le but de développer une stratégie d'optimisation prédictive de ses performances dans le cas de l'utilisation de différents modèles de balayage.

Plus spécifiquement, il s'agit de (i) réaliser une investigation expérimentale dans le but d'évaluer les effets de plusieurs modèles de balayage et des principaux paramètres connus pour avoir de l'influence sur le profil de dureté et sur les principales caractéristiques de la surface durcie dans le but d'identifier les paramètres à considérer dans le développement d'un modèle numérique d'analyse thermique 3D. (ii) Développer et valider expérimentalement un modèle numérique 3D dans le but d'être en mesure de simuler le comportement dans des conditions de traitement difficiles à réaliser expérimentalement et de bâtir une base de données, combinant résultats expérimentaux et résultats de simulations, suffisamment riche et variée nécessaire au développement des



modèles prédictifs les plus performants possibles. (iii) Développer des modèles directs et inverses du procédé suffisamment précis et robustes afin de mettre en œuvre la stratégie d'optimisation prédictive proposée.

## **0.5 MÉTHODOLOGIE**

Pour atteindre les objectifs identifiés plus haut, une approche en trois phases est adoptée. Suite à une étude rigoureuse de la littérature disponible dans le domaine, les modèles de balayage ayant un potentiel intéressant pour le déplacement de la source laser pour des traitements thermiques superficiels raisonnablement acceptables ont été sélectionnés. Les paramètres nécessaires à leur implantation aussi bien dans un modèle numérique que dans les modèles prédictifs sont également identifiés. Ces informations constituent la base de la première phase du projet qui consiste à conduire une investigation expérimentale pour évaluer les effets des modèles de balayage sélectionnés sur les principales caractéristiques des surfaces durcies lors du traitement thermique superficiel par laser. Les modèles linéaire, sinusoïdal, triangulaire et trochoïde sont les patrons de balayage considérés dans ces investigations. La profondeur durcie et la largeur durcie sont les deux caractéristiques étudiées. Le procédé de traitement est réalisé à l'aide d'une cellule robotisée de traitement thermique équipée d'une source laser Nd-YAG 3 kW sur des plaques en acier AISI 4340 de 60 mm de longueur, 6 mm de largeur, 5 mm d'épaisseur. Les plaques sont préalablement trempées et revenues à une dureté de 25 à 30 HRC. Une série d'essais préliminaires est nécessaire, d'une part, pour optimiser la programmation des trajectoires associées aux quatre patrons de balayage, et d'autre part, pour identifier les plages de variation des différents paramètres du procédé et tester la répétabilité du procédé et estimer les erreurs expérimentales.

Les expériences proprement dites sont construites selon des plans d'expériences factoriels fractionnaires permettant de minimiser le nombre des essais tout en assurant la fiabilité et traçabilité des résultats. Après traitement, les échantillons sont analysés selon une démarche métallographique standard qui consiste à découper soigneusement les plaques, enrober et polir les échantillons, mesurer la dureté des pièces et finalement effectuer l'attaque chimique pour mesurer la profondeur et la largeur durcies. La dureté est mesurée sur une machine de mesure de micro-dureté CLEMEX. L'attaque chimique est faite en utilisant une solution chimique de Nital composée de 95% d'éthanol et 5%

d'acide nitrique pour délimiter le profil de dureté et prendre les mesures nécessaires à l'aide d'un projecteur de profil. L'évaluation des effets des différents paramètres et de leurs interactions sur les caractéristiques mesurées est réalisée en utilisant des techniques statistiques spécifiques telles que l'analyse de la variance, l'analyse corrélacionnelle, les surfaces de réponses ou d'autres techniques graphiques.

La phase 2 est consacrée au développement et à la validation du modèle numérique pour l'analyse thermique 3D du procédé. Cette phase repose sur la préparation d'un modèle de base capable de simuler le comportement du procédé dans le cas de durcissement avec balayage simple tel que le patron linéaire. Le modèle est basé sur la méthode des éléments finis et utilise le logiciel COMSOL Multiphysics comme support pour la simulation des flux thermiques et des différents patrons de balayage en trois dimensions (en surface et en profondeur de la pièce). Le choix de COMSOL et son module complémentaire Live Link With MATLAB est dicté par la nécessité de modéliser simultanément plusieurs phénomènes physiques avec des possibilités d'interaction avec des fonctions développées par l'utilisateur.

Le module complémentaire facilite la modélisation, le calcul et la visualisation des résultats. Il permet essentiellement à MATLAB d'accéder et d'exécuter les fichiers COMSOL pour la récupération, le prétraitement et la visualisation des résultats de l'analyse thermique. À noter que les résultats issus de la phase expérimentale sont utilisés pour la validation des modèles 3D. Une fois validé, le modèle 3D est utilisé pour simuler le comportement du procédé dans des conditions de traitement autres que celles réalisées expérimentalement. Cette phase va également permettre d'approfondir l'analyse des effets des paramètres de chauffage et des modèles de balayage sur les principales caractéristiques des surfaces durcies. Les données obtenues vont permettre de bâtir la meilleure base de données possible pour une meilleure modélisation prédictive.

La phase 3 est consacrée au développement et à l'implantation de la stratégie d'optimisation prédictive proposée. Dans cette phase, une base de données intégrant les données provenant de l'expérimentation et les données issues des simulations numériques est combinée aux avantages qu'offrent les modèles prédictifs à base de réseaux de neurones artificiels pour conduire l'approche d'optimisation. Inspirés des techniques de commande des systèmes dynamiques, l'approche est basée sur la combinaison des modèles directs et inverses du procédé pour produire les paramètres optimaux du procédé.

L'apprentissage et la validation des modèles reposent sur des procédures et des critères spécifiques d'affectation des données et d'évaluation des performances des modèles aussi bien en termes de précision que de robustesse.

## **0.6 ORGANISATION DU MÉMOIRE**

Ce mémoire est étalé sur cinq parties principales, soit une introduction générale, trois articles et une conclusion générale. L'introduction décrit, tout d'abord, le laser, ses caractéristiques et son principe de fonctionnement. Ensuite, elle présente une brève revue sur les aciers, leurs compositions et leurs performances. Puis, elle aborde les différents procédés et techniques de traitement thermique en surfaces des aciers, tout en mettant l'accent sur le procédé de traitement thermique par laser. L'introduction présente également la problématique, les objectifs et la méthodologie adoptée du projet de recherche.

Le premier article présente une investigation expérimentale qui sert à déterminer l'effet d'utilisation des différentes trajectoires de déplacement du faisceau laser lors du procédé de traitement thermique par laser appliqué sur des plaques fabriquées en acier AISI 4340. Cet article consiste aussi à évaluer les effets des paramètres du procédé et de leurs interactions sur les profils de dureté obtenus par les différents patrons de déplacement. Les essais sont effectués selon un plan d'expérience bien structuré et l'analyse des résultats est effectuée en utilisant des outils de calcul statistique approuvés.

Le second article consiste essentiellement au développement des modèles de simulation numérique 3D capables de simuler précisément ce mode de traitement thermique. Le but est de construire une base de données assez importante afin de l'utiliser, par la suite, à l'élaboration des modèles de prédiction.

Le troisième article est consacré au développement des modèles prédictifs directs et inverses en se basant sur les réseaux de neurones artificiels qui offrent une meilleure qualité de prédiction, afin d'élaborer une stratégie d'optimisation efficace.

Finalement, la dernière partie de ce mémoire comporte une conclusion générale qui présente les principaux résultats, des recommandations et des perspectives pour des futures recherches.



## CHAPITRE 1

### INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL PAR LASER AVEC DIFFÉRENTS MODÈLE DE BALAYAGE APPLIQUÉ À L'ACIER AISI 4340

#### 1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Le durcissement par transformation de surface au laser devient l'un des procédés les plus utilisés pour améliorer la résistance à la fatigue et à l'usure des surfaces d'aciers. Dans ce procédé, les propriétés du matériau et les paramètres de chauffage sont les facteurs qui ont le plus d'effet sur les caractéristiques de la surface durcie. Le contrôle de ces facteurs à l'aide d'approches de modélisation prédictives permettant d'obtenir les propriétés de surface souhaitées est susceptible de conduire à des résultats concluants. Cependant, lorsque les dimensions de la surface à traiter sont plus grandes que la section transversale du faisceau laser, différents modèles de balayage de la source laser peuvent être utilisés.

Cet article présente une investigation expérimentale du procédé de traitement thermique superficiel par laser de l'acier AISI 4340 en utilisant différents modèles de balayage laser. Cette étude est basée sur un plan d'expériences structuré utilisant la méthode Taguchi et des outils d'analyse statistique améliorés. L'expérimentation est réalisée par une source laser Nd:YAG de 3 kW afin d'évaluer les effets des paramètres de chauffage et des paramètres de conception des modèles de balayage sur les caractéristiques physiques et géométriques de la surface durcie. La puissance du laser, la vitesse de balayage et le type de patron de déplacement (linéaire, sinusoïdal, triangulaire et trochoïde) sont les facteurs considérés pour évaluer les variations de la profondeur durcie ( $HD$ ) et de la largeur durcie ( $HW$ ) et pour identifier les relations possibles entre ces facteurs et les caractéristiques des zones durcies. Divers outils statistiques tels que l'ANOVA, l'analyse des corrélations et les surfaces de réponse sont utilisés afin d'examiner les effets des paramètres du procédé sur les caractéristiques de la surface durcie.

Les résultats obtenus révèlent que la puissance du laser affecte positivement la  $HD$  plus que la  $HW$ , tandis que la vitesse de balayage affecte négativement la  $HW$  plus

que la *HD*. Ces résultats montrent également que le patron sinusoïdal peut être recommandé si un maximum de *HW* avec une *HD* acceptable est souhaité. Sinon, il serait préférable d'utiliser un patron trochoïde.

Ce premier article, intitulé « Experimental investigation of laser surface hardening of AISI 4340 steel using different laser scanning patterns », a été publié dans la revue scientifique « Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering ». Il a été élaboré par moi-même, le professeur Abderrazak El Ouafi et le professeur Ahmed Chebak. En tant que premier auteur, ma contribution s'est concentrée principalement sur la recherche bibliographique, le développement de la méthode, l'exécution des tests de performance, l'analyse des résultats et la rédaction de l'article. Le financement et l'idée originale de l'article ont été fournis par le professeur Abderrazak El Ouafi, il a contribué également avec le professeur Ahmed Chebak au développement de la méthode, la vérification des mesures, l'analyse des résultats et la rédaction de l'article.

## **1.2 EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER SURFACE HARDENING OF AISI 4340 STEEL USING DIFFERENT LASER SCANNING PATTERNS**

### **1.2.1 Abstract**

Laser surface transformation hardening becomes one of the most modern processes used to improve fatigue and wear properties of steel surfaces. In this process, the material properties and the heating parameters are the factors that present the most significant effects on the hardened surface attributes. The control of these factors using predictive modeling approaches to achieve desired surface properties leads to conclusive results. However, when the dimensions of the surface to be treated are larger than the cross-section of the laser beam, various laser scanning patterns are involved.

This paper presents an experimental investigation of laser surface hardening of AISI 4340 steel using different laser-scanning patterns. This investigation is based on a structured experimental design using the Taguchi method and improved statistical analysis tools. Experiments are carried out using a 3 kW Nd: YAG laser source in order to evaluate the effects of the heating parameters and patterns design parameters on the physical and geometrical characteristics of the hardened surface. Laser power, scanning speed and scanning patterns (linear, sinusoidal, triangular and trochoid) are the factors

used to evaluate the hardened depth and the hardened width variations and to identify the possible relationship between these factors and the hardened zone attributes. Various statistical tools such as ANOVA, correlations analysis and response surfaces are applied in order to examine the effects of the experimental factors on the hardened surface characteristics.

The results reveal that the scanning patterns do not modify the nature of the laser parameters' effects on the hardened depth and the hardened width. But they can accentuate or reduce these effects depending on the type of the considered pattern. The results show also that the sinusoidal and the triangular patterns are relevant when a maximum hardened width with an acceptable hardened depth is desired.

**Keywords:** Laser Surface Hardening Process, Experimental Investigation, Laser Scanning Patterns, AISI 4340 Steel, Hardness Profile, Hardened Depth, Hardened Width, Design of Experiment, Analysis of Variance.

### 1.2.2 Introduction

Laser surface transformation hardening process (LSTHP) is increasingly used to heat treat mechanical parts surfaces in order to enhance their mechanical properties. By applying concentrated, short and localized thermal inputs, LSTHP can improve the wear and fatigue resistance of the treated zones [1] [2]. Compared to other surface heat treatment processes, LSTHP presents several advantages such as selective and precise hardening zones, minimization of undesirable deformation and distortion, application of very fast thermal cycles to obtain autogenous hardening, treatment for parts with complex geometry through the use of robots, and possibility of full process automation and control [3] [4].

In LSTHP, the hardened surface characteristics depend essentially on the laser heating process parameters and the thermo-physical properties of the material to be treated. For an adequate use of this process, it is necessary to better understand the operating mode and to develop robust predictive models that can be used to control and adjust the process parameters in order to estimate precise hardened surface characteristics without using the traditional long and costly experimental procedures [3] [4] [5]. The produced models can be used to predict the hardness profile attributes for various heating parameters and conditions. Two kinds of models can be developed in this perspective:

numerical models and empirical models. The numerical models combine laser spot form and motion, non-linear properties of the material and the heat flow equation using the finite element method (FEM). This approach uses a heat flow equation in order to determine the temperature distribution for each heat treatment phase. The hardness is then approximated by the Ashby and Easterling equations [3] [6]. The empirical models are based on experimental data that can be collected using structured design of experiments, and analyzed using statistical tools in order to extract the arithmetical relationship between the heating parameters and the hardness profile attributes.

In LSTHP of large surfaces, the simplest technique frequently used is called multi-track treatment. This technique consists to execute several passes one next to the other until the surface is completely covered. In some cases, the number of laser beam passes can be prohibitive. The reduction of the number of passes for a given surface can be, theoretically, achieved by increasing the diameter of the beam spot. This is an unrealistic and very expensive solution. In addition, the multi-track technique generates overheated zones between every two successive passes where the hardness decreases dramatically. Therefore, it is necessary to improve the technique or to look for other alternatives [7] [8]. Researchers such as Lakhkar *et al.* [7] have improved this method while trying to minimize overheated areas between hardening tracks where hardness decreases, and have succeeded to obtain a hardness that varies between 48 and 58 HRC using 850 W laser power. They have found also that hardness variation can be controlled by the spacing between the tracks [7]. But this method is still unsatisfactory since the number of passes increases rapidly by increasing the surface to be treated, which prolongs the treatment time and increases the energy supply causing the deformation of parts. Xue *et al.* [10] have worked on another treatment technique called “Dot matrix treatment”, which generally consists of treating just a certain percentage of the surface with a uniform distribution using a pulsed laser beam. This method has reduced the energy applied to the part to be treated, thus avoiding distortion of the part, but the risk of wear and tear in untreated areas always precedes the treated areas [9] [10]. Using this method, Straffellini *et al.* [11] proved that tensile strength and wear resistance increased as the density of the matrix increased.

There is also another interesting treatment technique that can be used and which is based on the use of complex laser beam moving patterns during the laser hardening



process. The use of certain types of trajectories allows mainly to treat the maximum of the surface with a single pass, this allows to optimize the laser treatment process of the relatively large geometries. To date, few pieces of research have addressed this method although the energy supply is enormously optimized and the treatment time is reduced. Sistaninia *et al.* are almost among the only researchers who have studied this method of treatment [12]-[17]. However, their efforts were focused on the development of analytical models that analyze the temperature distribution obtained by different beam displacement patterns, which explains the importance of an experimental analysis of the effect of this technique on the obtained hardness profile. Sistaninia and Farrahi [12] [16] have determined that for given laser power, a sinusoidal moving trajectory has a more uniform temperature distribution than a trochoid trajectory [12] [16], and Zhou and Tan [13] [17] have shown that an increase in frequency leads to a drop in the maximum temperature. Therefore, an experimental investigation of interactions between the different phenomena during the hardening process is necessary to develop predictive models able to control the parameters of this heat treatment technique in order to produce the appropriate hardened surface characteristics.

The objective of this paper is to evaluate the effect of using different displacement trajectories during the laser heat treatment process of AISI 4340 steel plates. This is done by conducting an experimental investigation of the moving pattern effect and the process parameters' effect on the hardness profile. This study allows to determine the trajectory that will allow to have the best hardness profile (best depth and hardness distribution) to optimize the process. The investigation is based on a structured design of experiments and various statistical analysis tools. Experiments are carried out by using a 3 kW Nd: YAG laser source where four moving patterns are considered: linear, sinusoidal, triangular and trochoid patterns. The obtained results permit to understand the effects of patterns as well as laser parameters on the hardened zone attributes.

### **1.2.3 Experimentation**

#### **1.2.3.1 Methodology**

The experimental investigation is conducted on AISI 4340 steel 60 mm long, 6 mm wide, 5 mm thick plates hardened and tempered to 25 - 30 HRC (Figure 7). The parts were oil quenched after complete austenitization in the furnace, then quenched to blacken

their color and to improve the absorptivity of the laser irradiation. The chemical composition of the material is shown in Table 1. To carry out the various experiments, an Nd: YAG laser source was used, powered by an YLS-3000-ST2 IPG fiber laser and mounted on a six-axis FANUC M-710IC robot. The ILVDC-Scanner system mounted on the laser head is used to perform the desired scanning patterns. The used laser source has a maximum power of 3000 W, a wavelength of 1070 nm and a focal length of 310 mm. The diameter of the focal spot used in this study is 0.52 mm, and it can be modified by means of a collimator fixed on the laser head. The main elements of the laser cell are presented in Figure 8. Figure 9 illustrates the four moving patterns considered in this study.

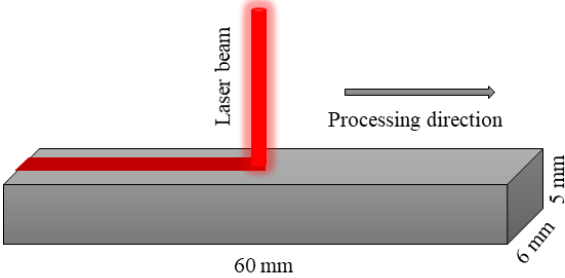


Figure 7 : Schematic illustration of laser transformation hardening

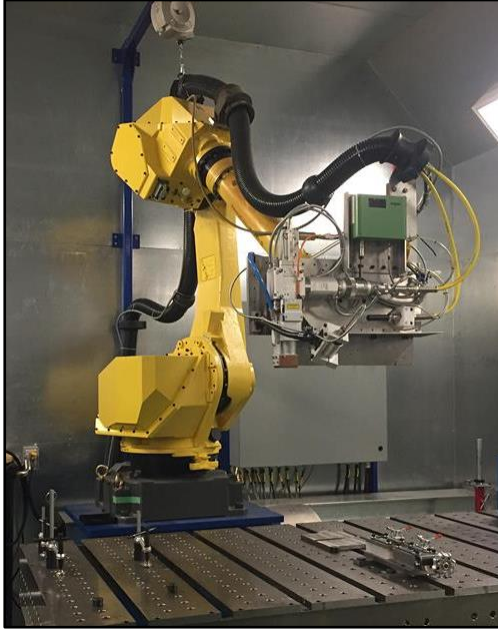


Figure 8 : Experimental setup of steel plate’s laser surface hardening using laser cell

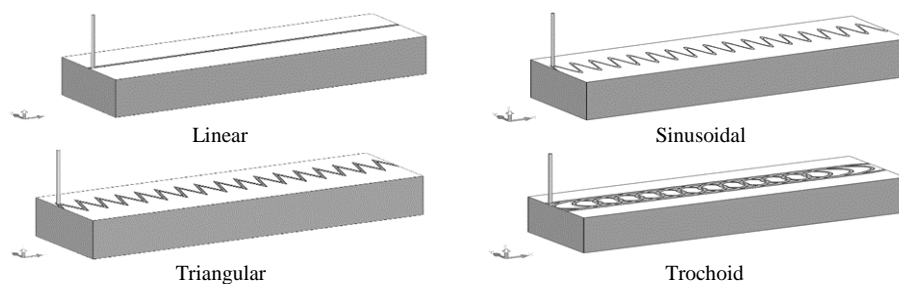


Figure 9 : Schematic illustration of the considered laser scanning patterns

Table 1: Chemical composition of AISI 4340 steel

Component	Fe	Ni	Cr	Mn	C	Mo	Si	S	P	Ce	Cf
%	95.71	1.83	0.81	0.7	0.4	0.25	0.23	0.04	0.03	0.8	0.01

The main parameters selected in the present study are laser power ( $P$ ), Scanning speed ( $SS$ ) and type of moving pattern. As shown in Figure 10, the measured quantities are the hardened depth ( $HD$ ) and the hardened width ( $HW$ ), which represent two properties to be optimized by the laser heat treatment process. After the laser processing, the samples are analyzed using a standard metallographic approach that consists of carefully cutting the plates using an Abrasi-Matic300 cutting machine, then coating and polishing the samples, then measuring the hardness of the parts and finally performing the chemical etching to measure the hardened depth and the hardened width. The chemical attack was performed using Nital's chemical solution (95% ethanol and 5% nitric acid). The hardened depth and hardened width measurements are taken by a CLEMEX precision microscope, and the hardness profile is determined based on the micro-hardness measurements using the Clemex machine.

### 1.2.3.2 Preliminary tests

Due to the lack of a database in the literature that provides the ranges of variation of the laser hardening process parameters, preliminary tests were carried out to define its intervals in order to ensure a hardened surface with a minimal melting zone. By varying one parameter at a time, the combination of maximum power and minimum scanning speed allows to have maximum hardened depth and maximum hardened width but with some surface melting. On the other hand, the combination of minimum power and maximum scanning speed allows to have a minimum hardening depth and width but without melting the surface. Consequently, the minimum and maximum limits for each

processing parameter are defined based on these preliminary tests, where the variation range of the power is selected between 500 and 800 W and the speed varies between 20 and 40 mm/s.

### 1.2.3.3 Experimental design

To establish experimental tests, it is essential to use an experimental design that can provide relevant results with the minimum number of tests to be performed, while respecting the ranges of variation already defined by the preliminary tests.

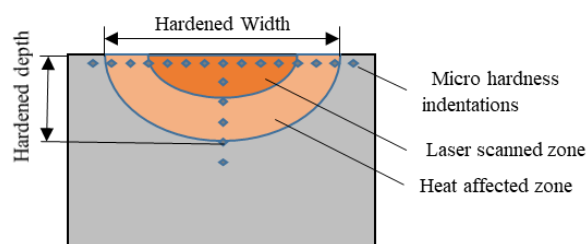


Figure 10 : Cross-section of the steel plate with the variables to be measured

Depending on the number of factors and their assigned levels, a systematic design based on factor design is an excellent tool to use and leads to an understanding of the material's behavior towards this processing technique. Due to their efficiency and simplicity, factorial designs are the most advised recommended designs to use, although the number of tests increases exponentially when an additional parameter or level is adopted at design, making the study more expensive and time-consuming [18]. However, fractional designs can collect statistically significant data on the studied phenomenon, on the effects of the process parameters and even on the interactions between the factors with the minimum number of tests [18]. Consequently, a Taguchi plan was established as an experimental design for this study. For each moving trajectory, 2 factors, 3 levels  $L_9$  matrix is used in order to determine the effect of power and scanning velocity on the hardened depth and hardened width of the steel plates. Indeed, the choice to introduce three levels for each parameter is intended to study the nonlinearity of the parameter effects and the interactions between them. The selected factors and their levels are identified in Table 2. The experimental design that best fit this problem is illustrated in Table 3.

### 1.2.3.4 Preliminary Tests and Repeatability

To improve the accuracy and validity of the results, four tests were performed under the same working conditions (power of 650 W and a scanning speed of 30 mm/s for a linear track), which also allows to estimate the overall and relative errors of measurements. These errors can be caused by uncontrollable factors such as a sudden change in ambient temperature during processing, non-uniformity of the chemical composition of the base material, incorrect calibration or use of measuring instruments, etc. The results presented in Table 4 show good precision of the measurement since the variations are less than 6%. These results then guarantee the validity of the measurement method and make it possible to carry out the final tests with confidence.

### 1.2.4 Results analysis and discussion

The use of different laser scanning patterns leads to different hardened surfaces topology in terms of hardened depth, hardened width and hardness homogeneity. A slight surface fusion is also present in some cases but in a negligible and acceptable gradation, since the selection of parameter variation ranges during the preliminary tests contributed significantly to minimize this phenomenon.

Table 2: Selected parameters and their levels for experimentation

<b>Factor \ Level</b>	<b>Level 1</b>	<b>Level 2</b>	<b>Level 3</b>
<b>Power (W)</b>	500	650	800
<b>Scanning speed (mm/s)</b>	20	30	40

Table 3: Experimental design used for each laser scanning patterns

<b>Test</b>	<b>Power (W)</b>	<b>Scanning speed (mm/s)</b>
<b>1</b>	500	20
<b>2</b>	500	30
<b>3</b>	500	40
<b>4</b>	650	20
<b>5</b>	650	30
<b>6</b>	650	40
<b>7</b>	800	20
<b>8</b>	800	30
<b>9</b>	800	40

Table 4: Results of the repetition tests

Measured property	Max	Min	Mean	Standard deviation	Relative error
<i>HD</i> ( $\mu\text{m}$ )	665	626	653,75	18.83	5.96%
<i>HW</i> ( $\mu\text{m}$ )	865	838	854	12.24	3.16%

Figure 11 shows typical hardness profiles (*HD* and *HW*) achieved using various laser parameters applied to the traditional linear scanning pattern. Images 11a, 11b and 11c present the hardness profiles achieved using scanning velocity of 20 mm/s for power of 500, 650 and 800 W respectively. Images 11d, 11e and 11f illustrate the hardness profiles at a fixed power of 800 W and at scanning speed of 20, 30 and 40 mm/s, respectively. Figure 11(a) illustrates also the difference between the base metal and the hardened zone at the microscopic level where it is clear that the metallographic structure of the treated area is denser than that of the base metal.

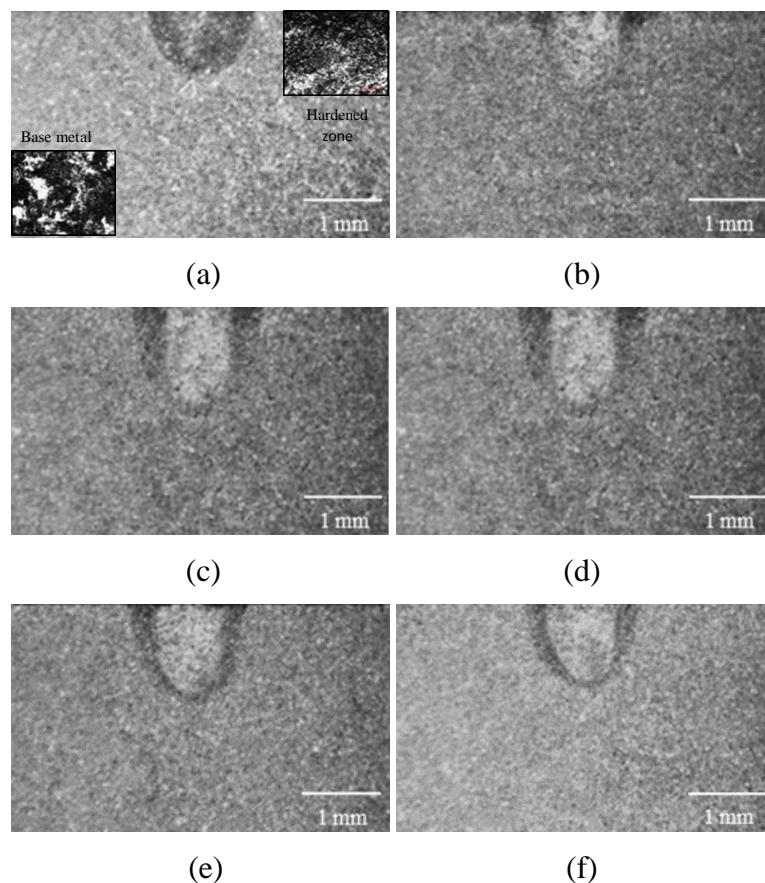


Figure 11 : Typical hardened zones achieved using linear scanning pattern at various laser parameters

This density is the result of the immigration of carbon grains into the austenite during heating by the laser beam and its transformation into martensite during cooling. From these figures, it is clear as expected that the laser power has a positive effect on the hardness zone dimensions, while the increase of the scanning velocity has a negative effect. These observations confirm that both factors have direct effects on the hardness zone in terms of both hardened depth and hardened width. However, these effects that are the consequences of spatial temperature distribution can be completely transformed when using others scanning patterns. This transformation modifies considerably the thermal topology of the hardened surface.

Figure 12 shows typical hardness profiles achieved using various laser scanning patterns. The variation of  $HD$  and  $HW$  from a scanning pattern to another is directly related to pattern specifications such as amplitude, frequency and focal spot. This figure describes the variation of hardness profile for test 7 that uses a scanning velocity of 20 mm/s and laser power of 800 W. The scanning pattern geometry affects the exposure time of different portions of the part surface to the laser radiation. Depending on the scanning pattern, some zones of the surface can be exposed to the heat source repeatedly and for a longer time. An increase of the exposure interval gives more time for the carbon to migrate homogeneously into the austenite producing a larger treated surface. However, this time must not exceed certain limits to avoid melting zones and unwanted deformations of the treated surface.

Moreover, Figure 12 shows that the sinusoidal pattern presents the best compromise between hardened depth, hardened width and hardness distribution uniformity. Trochoid pattern produces high  $HD$  and  $HW$  but with a very irregular hardness distribution. The triangular pattern produces  $HD$  and  $HW$  with a uniform distribution but remains less than that achieved by sinusoidal pattern. Linear pattern presents, as anticipated, the maximum hardened depth and a good hardness distribution but with the lowest  $HW$ . In the linear scanning pattern, the laser power remains concentrated below the focal spot.  $HD$  is maximum but  $HW$  slightly exceeds the beam diameter. For the other patterns, the laser power is distributed over the entire amplitude of the trajectory increasing the width of the hardened surface. The increase of the  $HW$  results inexorably in a decrease of  $HD$ .

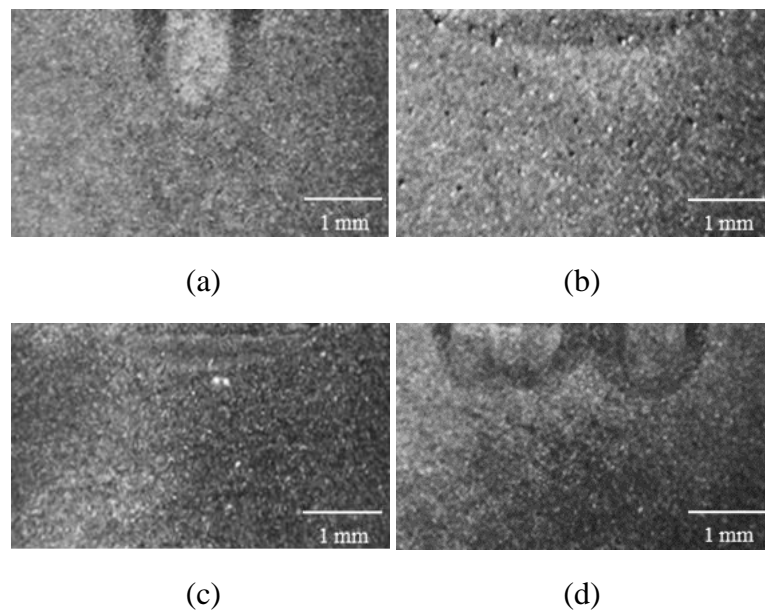


Figure 12 : Typical hardened zones using a power of 800 W and a scanning speed of 20 mm/s for a) linear, b) sinusoidal, c) triangular and d) trochoid scanning patterns

Table 5 presents the hardened depths and hardened widths collected from the experiments. These results are analyzed using several statistical indicators extracted from the analysis of variance (ANOVA) such as percent contribution of each parameter in *HD* and *HW* variations, the average effects graphs, the correlation between the measured characteristics and the laser parameters, and the graphs of the response surfaces. Generally, the parameter with the highest percentage contribution represents the most significant parameter. The total sum of the contributions of the considered parameters should reach 100%. The difference is usually attributed to uncontrolled factors or experimental errors.

The graphs of average effects consist of visualizing the effect of each parameter on the hardened zone characteristics. These graphs allow easy comparisons between the parameter's effects and a better understanding of the connections between these parameters and the characteristics to evaluate. The response surface method (RSM) is adopted to explore the nature of relationships between the experimental factors and the hardness profiles.

The results of ANOVA performed on the four  $L_9$  are presented in Table 6. The analysis of the parameter contribution reveals different results between linear pattern and other scanning patterns. Generally, the laser power affects *HD* more than the scanning



speed regardless of the scanning pattern. However, the scanning speed affects *HW* more than the power. An increase in power mainly leads to an increase in *HD* and *HW*, while an increase in the scanning speed leads to a decrease in *HW* and a decrease in *HD*.

Table 5: Experimental results achieved using the four performed L9

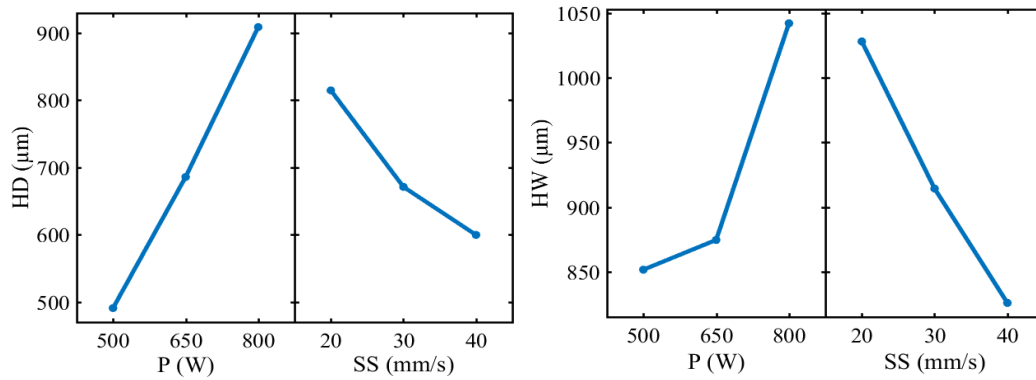
Pattern	Linear		Sinusoidal		Triangular		Trochoid	
	<i>HD</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HW</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HD</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HW</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HD</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HW</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HD</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>HW</i> ( $\mu\text{m}$ )
1	623	946	263	2708	259	2486	613	2425
2	458	854	167	2550	180	2405	593	2341
3	392	755	125	2293	147	2312	457	2262
4	809	984	330	2779	490	2504	632	2493
5	661	862	243	2607	280	2436	619	2384
6	587	778	189	2478	224	2354	482	2302
7	1011	1154	456	2808	574	2516	802	2578
8	894	1027	308	2684	426	2483	757	2410
9	820	945	251	2507	306	2368	713	2359

For linear pattern, power contribution represents more than 75% in the *HD* variation while it varies between 45 and 58% for the rest of the patterns. The contribution of the scanning speed in the *HW* variation is between 73 and 86% for sinusoidal, triangular and trochoid patterns. However, it does not exceed 50% for linear pattern. The contribution of the error is minimal in most cases and does not exceed 10%. This points out the accuracy of the achieved experimental results and presumes good experimental planning and measurement.

These observations are confirmed by the graphs of the average effects presented in Figures 13-16. According to these figures, it is clear that the increase of laser power affects positively the hardened depth and width, while the increase of scanning speed affects negatively these two characteristics for the four scanning patterns. The magnitude of these effects varies considerably from one pattern to another. These results are confirmed by the correlation analysis between laser parameters and hardened zone dimensions for the four scanning patterns presented in Table 7. Strong correlation can be observed between power and *HD* and between scanning speed and *HW*.

Table 6: ANOVA analysis for the hardened depth and width for the four moving pattern

Pattern type	Source	<i>HD</i>		<i>HW</i>	
		Contribution (%)	F-value	Contribution (%)	F-value
<b>Linear</b>	Power	78.20	20.09	42.91	2.22
	Scanning speed	20.69	7.10	48.33	0.62
	Power*SS	0.12	0.61	0.06	0.04
	Error	0.99	-	8.70	-
<b>Sinusoidal</b>	Power	45.27	13.46	15.61	0.05
	Scanning speed	50.11	0.03	80.43	16.81
	Power*SS	1.44	2.27	1.52	3.09
	Error	3.18	-	2.44	-
<b>Triangular</b>	Power	51.15	16.91	10.42	0.10
	Scanning speed	41.18	0.56	86.31	9.50
	Power*SS	3.60	4.43	0.39	0.68
	Error	4.07	-	2.88	-
<b>Trochoid</b>	Power	58.20	0.31	22.65	7.73
	Scanning speed	32.48	1.14	73.07	0.52
	Power*SS	1.06	0.32	1.05	1.62
	Error	8.26	-	3.23	-

Figure 13 : Main effects of laser parameters on *HD* and *HW* for the linear moving pattern

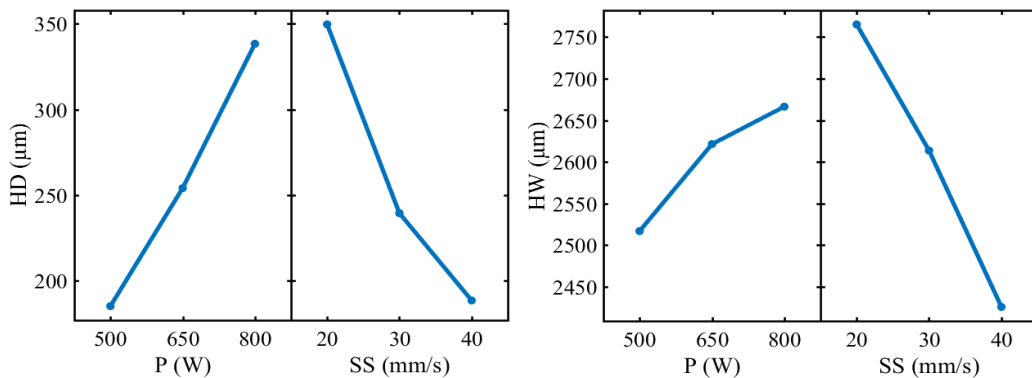


Figure 14 : Main effects of laser parameters on *HD* and *HW* for sinusoidal moving pattern

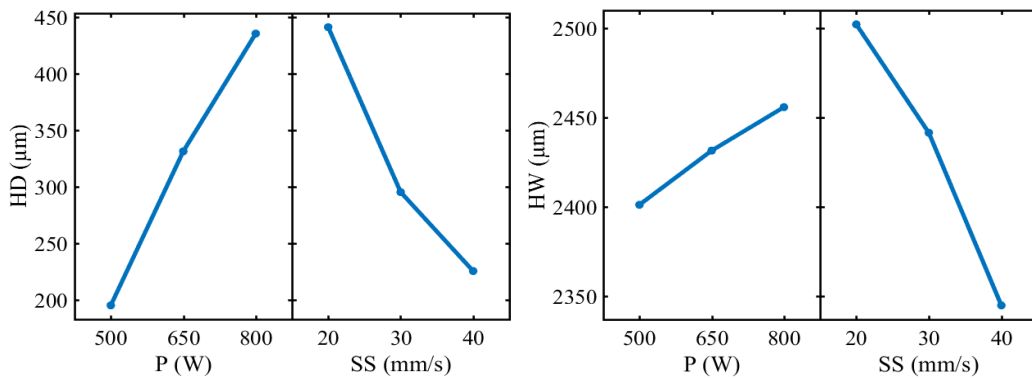


Figure 15 : Main effects of laser parameters on *HD* and *HW* for triangular moving pattern

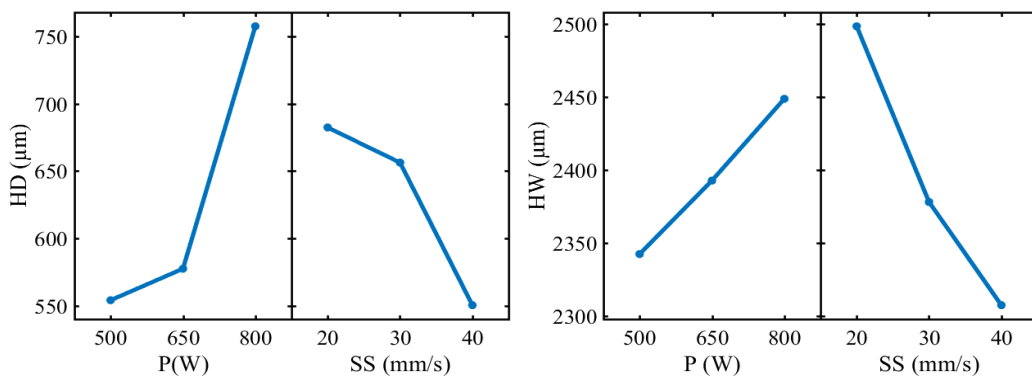


Figure 16 : Mains effects of laser parameters on *HD* and *HW* for trochoid moving pattern

Table 7: Correlation analysis between laser parameters and hardened zone dimensions for the considered scanning patterns

		Linear		Sinusoidal		Triangular		Trochoid	
		<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>
Power		88.43%	65.50%	67.28%	39.51%	71.52%	32.28%	76.29%	47.59%
Scanning speed		45.49%	69.52%	70.79%	89.68%	64.17%	92.91%	49.48%	85.48%
Linear	<i>HD</i>	-	90.79%	92.56%	75.21%	92.91%	70.12%	89.72%	81.46%
	<i>HW</i>	90.79%	-	95.48%	85.24%	91.24%	84.02%	93.33%	92.35%
Sinusoidal	<i>HD</i>	92.56%	95.48%	-	87.56%	96.41%	84.38%	84.25%	96.39%
	<i>HW</i>	75.21%	85.24%	87.56%	-	83.26%	98.10%	73.03%	93.34%
Triangular	<i>HD</i>	92.91%	91.24%	96.41%	83.26%	-	80.32%	79.98%	91.89%
	<i>HW</i>	92.91%	84.02%	84.38%	98.10%	80.32%	-	71.15%	91.16%
Trochoid	<i>HD</i>	92.91%	84.02%	84.25%	73.03%	79.98%	71.15%	-	77.33%
	<i>HW</i>	81.46%	92.35%	96.39%	93.34%	91.89%	91.16%	77.33%	-

ANOVA is also used to develop linear multiple regression models in order to establish a simplified empirical relationship to estimate or predict the hardened depth and the hardened width as a function of the laser parameters for the four moving patterns. Curves shown in Figures 17-20 present comparisons between measured and predicted hardened depth and hardened width. The predicted *HD* and *HW* values follow the measured values with an overall error of less than 10%. Table 8 presents the achieved regression models for both *HD* and *HW* that include the process parameters and their interactions.

Applying the same experimental design for the four scanning patterns provides the possibility to evaluate their direct effects on the hardened depth and the hardened width. The experimental results reveal that linear scanning pattern achieves the maximal *HD* and the minimal *HW* compared to other scanning patterns. In the case of test 7 with a laser power of 800 W and a scanning speed of 20 mm/s, the linear pattern produces a hardened zone characterized by *HD/HW* of 1011/1154  $\mu\text{m}$ , while the sinusoidal pattern produces a *HD/HW* of 456/2808  $\mu\text{m}$ . Under the same conditions and for the same test, the triangular trajectory reaches an *HD/HW* of 574/2516  $\mu\text{m}$ , while the *HD/HW* of the trochoid trajectory reaches 802/2578  $\mu\text{m}$ .

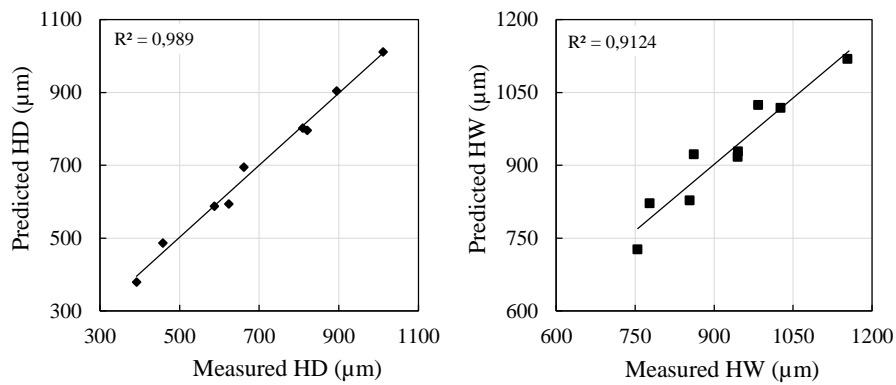


Figure 17 : Scatter plot - Measured and predicted *HD* and *HW* for linear scanning pattern

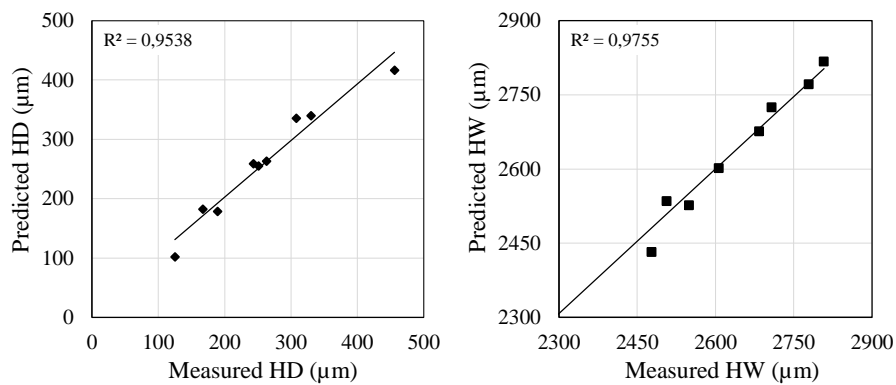


Figure 18 : Scatter plot - Measured and predicted *HD* and *HW* for sinusoidal scanning pattern

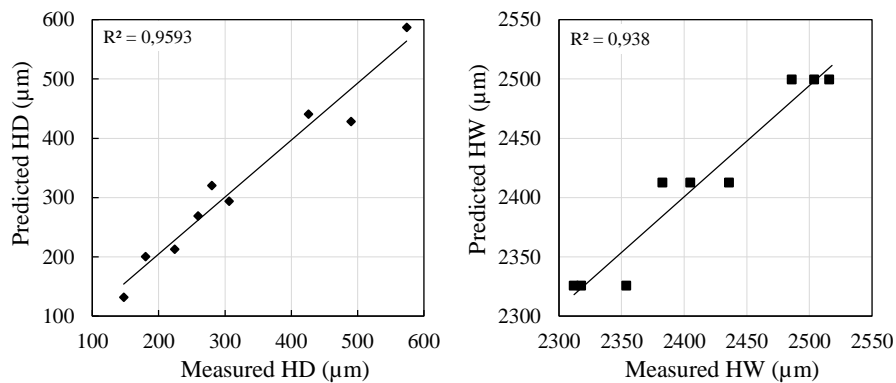


Figure 19 : Scatter plot - Measured and predicted *HD* and *HW* for triangular scanning pattern

Figure 21 presents an overview of the effect of each moving pattern on *HD* and *HW*. Figure 22 presents the micro-hardness measurement results in the form of hardness curves produced for test 7 achieved using maximum power and minimum scanning speed for each scanning pattern.

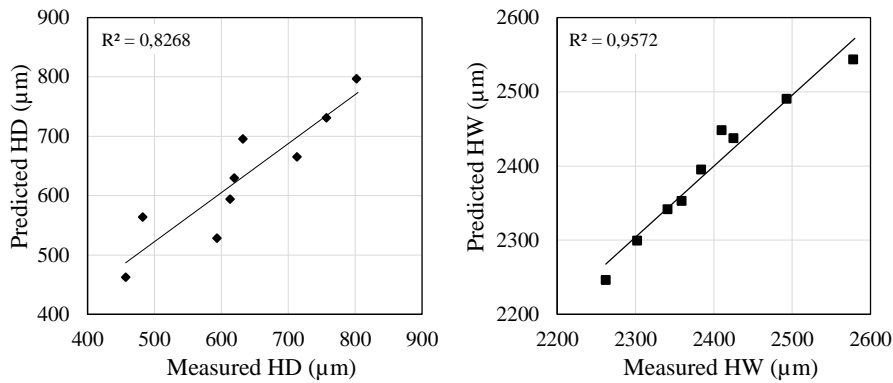


Figure 20 : Scatter plot - Measured and predicted *HD* and *HW* for trochoid scanning pattern

Table 8: Regression equations derived from ANOVA for the four moving patterns, where P is the laser power and SS is the scanning speed

Pattern	Hardened depth	Hardened width
<b>Linear</b>	$HD = 243 + 1,191 P - 15,07 SS + 0,006 P*SS$	$HW = 755 + 0,724 P - 8,1 SS - 0,003 P*SS$
<b>Sinusoidal</b>	$HD = -49 + 0,846 P - 0,81 SS - 0,011 P*SS$	$HW = 3157 - 0,072 P - 29,30 SS + 0,019 P*SS$
<b>Triangular</b>	$HD = -383 + 1,580 P + 6,13 SS - 0,026 P*SS$	$HW = 2631 - 10,68 SS + 0,052 P + 0,004 P*SS$
<b>Trochoid</b>	$HD = 605 + 0,342 P - 13,8 SS + 0,011 P*SS$	$HW = 2269 + 0,634 P - 3,48 SS - 0,009 P*SS$

The hardness curves confirm the same tendencies observed in Figure 21. When using a sinusoidal scanning pattern, the laser beam spends much more time in the peripheral areas of the surface to be treated compared to the triangular or trochoid pattern, which concentrates more time and power in the central zone that increases the hardened depth. Although the trochoid pattern presents good result, it generates a non-uniform *HD*. This lack of uniformity can cause several problems in the case of thin steel parts surface heat treatment. When the dimensions of the surface to be treated are larger than the cross section of the laser beam, some specific scanning patterns can be used to overcome the problem caused by the multi-track approach. The objective of choosing these scanning patterns is to maximize the surface of the hardened zone. This consists of maintaining a maximum uniform hardened width while respecting a minimum limit of hardened depth. In this perspective, if a minimum threshold is set for *HD*, the *HW/HD* ratio can be used as an indicator to evaluate the hardened zone surface according to the laser parameters

for the different scanning patterns.  $HW/HD$  ratio also provides useful information on how heat is absorbed by the surface. A priori, if  $HW/HD$  increases, the hardened surface increases on condition that  $HD$  is kept close to  $HD$  limit.

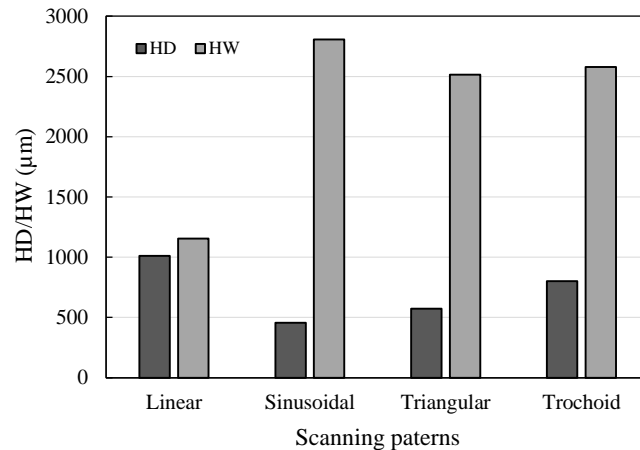


Figure 21 : Comparison of  $HD$  and  $HW$  achieved using various scanning patterns

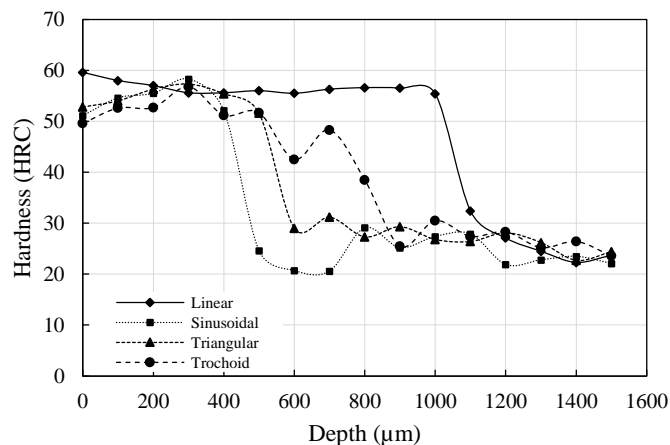


Figure 22 : Micro-hardness measurements achieved using the considered scanning patterns (test 7)

Table 9 presents the  $HW/HD$  ratio for various combinations of laser parameters and scanning patterns. The global average  $HW/HD$  ratio is, of course, higher than the average calculated excluding tests where  $HD$  is lower than  $200\ \mu\text{m}$ . In this table, it can be observed that sinusoidal and triangular scanning patterns present the highest  $HW/HD$  ratio. Therefore, these two patterns allow to achieve the largest hardened surfaces. With high  $HD$  and small  $HW$ , the linear pattern produces the low and relatively constant  $HW/HD$  ratio. Although producing a higher ratio and therefore a higher  $HW$  than linear pattern, the trochoid pattern presents practically constant  $HW/HD$  ratio. These

observations are confirmed by the contour plot presented in Figure 23.

Table 9:  $HW/HD$  ratio for various combination of laser parameters and scanning patterns

Tests	Laser parameters		$HW/HD$ ratio for scanning patterns			
	Power	Scanning speed	Linear	Sinusoidal	Triangular	Trochoid
1	500	20	1.52	10.30	9.60	3.96
2	500	30	1.86	15.27	13.36	3.95
3	500	40	1.93	18.34	15.73	4.95
4	650	20	1.22	8.42	5.11	3.94
5	650	30	1.30	10.73	8.70	3.85
6	650	40	1.33	13.11	10.51	4.78
7	800	20	1.14	6.16	4.38	3.21
8	800	30	1.15	8.71	5.83	3.18
9	800	40	1.15	9.99	7.74	3.31
Average			1.40	11.23	9.00	3.90
Average excluding $HD < 200 \mu\text{m}$			1.40	9.05	7.41	3.90

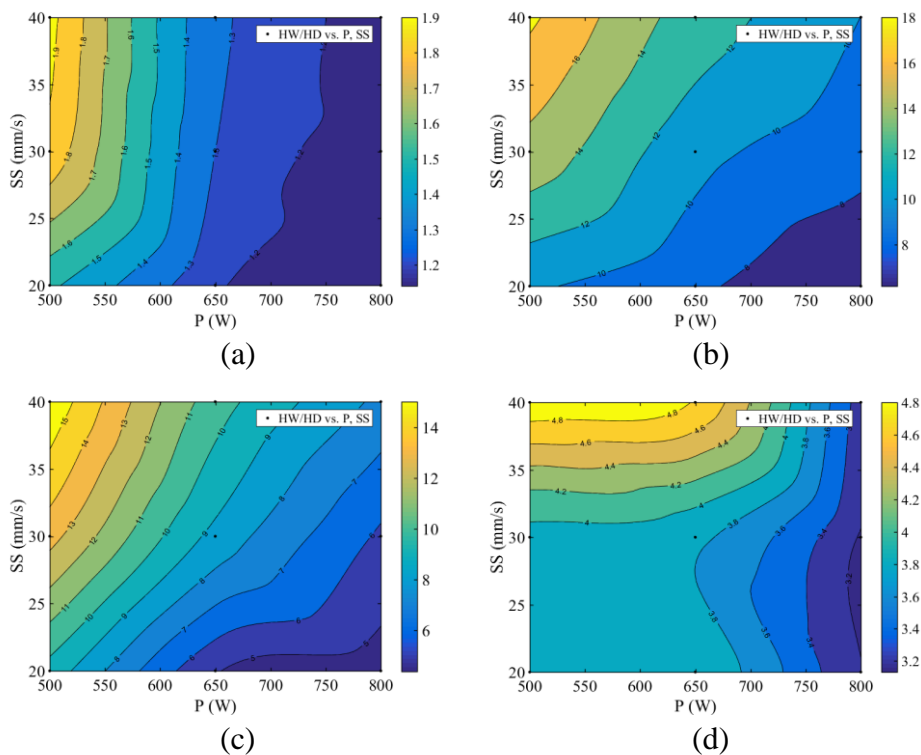


Figure 23 : Contour plot of  $HW/HD$  ratio vs  $P$  and  $SS$  for (a) linear, (b) sinusoidal, (c) triangular and (d) trochoid scanning pattern



These graphs reveal that  $HW/HD$  ratio increases with  $SS$  and decreases with  $P$ . This is typical because  $HW/HD$  tends to growth when  $HD$  decreases. If the laser parameters can be set to control a constant minimal  $HD$  close to 200  $\mu\text{m}$ , by adopting the maximum ratio,  $HW$  can reach a minimum of 385, 3670, 3145 and 990  $\mu\text{m}$  for linear, sinusoidal, triangular and trochoid scanning pattern, respectively. If the total generated heating energy is adjusted to maintain a constant minimal  $HD$ ,  $HW$  can reach higher values when using sinusoidal or triangular patterns.

### 1.2.5 Conclusion

This paper presents an experimental investigation of laser surface hardening of AISI 4340 steel using different laser scanning patterns. The experimentations are carried out using a 3 kW Nd: YAG laser system and considering four laser source moving patterns: linear, sinusoidal, triangular and trochoid pattern. The effects of laser process parameters, such as laser power and scanning speed and their interactions on the hardened depth and hardened width, for various laser scanning patterns, are evaluated and analyzed using structured experimental design and improved statistical analysis tools. Graphs of main effects, percent contributions, F-test, regression analysis, correlation analysis and response surface methodology are programmed, implemented and discussed for each scanning pattern. The results show that the laser power positively affects the hardened depth more than the hardened width, while the scanning speed negatively affects the hardened depth but more significantly the hardened width. However, the parameter's interactions have little effect on the hardness profiles. The results show also that the sinusoidal pattern gives a maximum width with an acceptable depth and a uniform hardness distribution, whereas the linear pattern gives a maximum depth with a width. The trochoid pattern presents a relatively good compromise between hardened depth and hardened width, but with an irregular hardness distribution and a non-uniform hardened depth. Hence, if a maximum of hardened width is required, it is recommended to use the sinusoidal pattern. For an extensive evaluation of the laser scanning pattern effects, it will be interesting to develop a numerical predictive model to conduct numerical investigations using a 3D thermal analysis.

### 1.2.6 References

- [1] Shercliff, H. and Ashby, M. (1991) The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening. *Metallurgical Transactions A*, **22**, 2459-2466. <https://doi.org/10.1007/BF02665012>
- [2] Selvan, J.S., Subramanian, K. and Nath, A.K. (1999) Effect of Laser Surface Hardening on En18 (AISI 5135) Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, **91**, 29-36. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00430-0)
- [3] Ashby, M., and Easterling, K. E. (1984) The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams—I. Hypo-eutectoid Steels. *Acta Metallurgica*, **32**, 1935-1948. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90175-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90175-5)
- [4] Leung, M.K.H., Man, H. C., and Yu, J. K. (2007) Theoretical and Experimental Studies on Laser Transformation Hardening of Steel by Customized Beam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, 4600-4606. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.022>
- [5] Steen, W., Watkins, K.G., and Mazumber, J. (2010) *Laser Material Processing*. 4th Edition, Springer, London, xvii, 558 p.
- [6] Mioković, T., Schulze, V., Vöhringer, O., and Löhe, D. (2006) Prediction of Phase Transformations During Laser Surface Hardening of AISI 4140 Including the Effects of Inhomogeneous Austenite Formation. *Materials Science and Engineering*: **435-436**, 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.037>
- [7] Lakhkar, R.S., Shin, Y.C., and Krane, M.J.M. (2008) Predictive Modeling of Multi-track Laser Hardening of AISI 4140 Steel. *Materials Science and Engineering*: **480**, 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.054>
- [8] Martínez, S., Lesyk, D., Lamikiz, A., Ukar, E., and Dzhemelinsky, V. (2016) Hardness Simulation of Over-tempered Area during Laser Hardening Treatment. *Physics Procedia*, **83**, 1357-1366. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.143>
- [9] Woodard, P.R., and Dryden, J. (1998) Thermal Analysis of a Laser Pulse for Discrete Spot Surface Transformation Hardening. *Journal of Applied Physics*, **85**(5): p. 2488-2496. <https://doi.org/10.1063/1.369610>
- [10] Xue, L., Islam, M. U., and McGregor, G. (1999) Dot Matrix Hardening of Steels Using a Fiber Optic Coupled Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials and Manufacturing Processes*, **14**, 53-65. <https://doi.org/10.1080/10426919908914804>
- [11] Straffelini, G., Menapace, C., and Molinari, A. (2002) Interpretation of Effect of Matrix Hardening on Tensile and Impact Strength of Sintered Steels. *Powder Metallurgy*, **45**, 167-172. <https://doi.org/10.1179/003258902225002587>

- [12] Farrahi, G.H., and Sistaninia, M. (2009) Thermal Analysis of Laser Hardening for Different Moving Patterns. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics* **22**, 169 - 180.  
[http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:40101143](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:40101143)
- [13] Zhou, H. (2011) Temperature Rise induced by a Rotating or Dithering Laser Beam. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, **5**, 443-468.
- [14] Komanduri, R., and Hou, Z. B. (2001) Thermal Analysis of the Laser Surface Transformation Hardening Process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**, 2845-2862. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00316-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00316-1)
- [15] Komanduri, R., and Hou, Z. B. (2004) Thermal Analysis of Laser Surface Transformation Hardening \_ Optimization of Process Parameters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**, 991-1008.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.01.011>
- [16] Sistaninia, M. (2009) Laser Heat Treatment of Metals using Rotating and Dithering Beams. *Recent Advances in Technologies*, IntechOpen.  
<http://dx.doi.org/10.5772/7396>
- [17] Tan, T., and Zhou, H. (2013) Numerical Solution for a Transient Temperature distribution on a Finite Domain Due to a Dithering or Rotating Laser Beam. *International Journal of Operations Research and Information Systems*. **4**, 38.  
<http://dx.doi.org/10.4018/ijoris.2013100102>
- [18] Philip, J.R. (1995) *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill, New York, 249.



**CHAPITRE 2**  
**INVESTIGATION NUMÉRIQUE PAR ANALYSE THERMIQUE 3D DU**  
**PROCÉDÉ DE TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL PAR LASER**  
**AVEC DIFFÉRENTS MODÈLE DE BALAYAGE APPLIQUÉ À L'ACIER AISI**  
**4340**

**2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE**

Le procédé de traitement thermique superficiel par laser est considéré actuellement comme l'un des procédés de traitement thermique les plus efficaces pour améliorer la résistance à l'usure et à la fatigue des pièces métalliques. Pour ce type de traitement, les paramètres du système de chauffage et les propriétés du matériau ont des effets importants sur les performances mécaniques des pièces traitées. Le contrôle de ces variables à l'aide des stratégies de modélisation et de simulation permet d'obtenir les propriétés de surface souhaitées sans avoir recours aux procédures traditionnelles et fastidieuses d'essais-erreurs. Toutefois, lorsque les dimensions de la surface à traiter sont plus importantes que la section transversale du faisceau laser, différents patrons de balayage laser peuvent être utilisés. En raison de leurs effets sur les propriétés de la surface durcie, les attributs des patrons de déplacement sélectionnés deviennent des variables significatives dans le procédé.

Cet article présente des investigations numériques et expérimentales menées sur le procédé de durcissement de surface au laser de l'acier AISI 4340 en utilisant différents patrons de déplacement. Ces investigations sont basées sur des efforts exhaustifs de modélisation et de simulation réalisés à l'aide d'une analyse thermique par éléments finis en 3D et d'une étude expérimentale structurée suivant la méthode Taguchi. La distribution de la température et les attributs du profil de dureté sont utilisés pour évaluer les effets des paramètres de chauffage et des paramètres de conception des patrons de déplacement sur les caractéristiques de la surface durcie. Ceci est très utile pour intégrer les propriétés des patrons de balayage dans une approche de modélisation prédictive efficace. La calibration et la validation expérimentale des modèles 3D sont effectuées par un système laser Nd:Yag de 3 kW en utilisant un plan d'expérience structuré et des outils d'analyse statistique confirmés.

Les résultats obtenus révèlent que les modèles peuvent fournir non seulement une prédiction cohérente et précise de la distribution de la température et des caractéristiques du profil de dureté dans des conditions de durcissement variables et difficiles à atteindre expérimentalement, mais aussi une analyse complète et quantitative des paramètres de chauffage et des effets des paramètres de conception des patrons. Les résultats de la modélisation montrent également une grande concordance entre les valeurs prédites et mesurées pour les dimensions des zones durcies.

La version finale du deuxième article a été soumise pour la publication en 2020 sous le titre « Numerical investigation of laser surface hardening of AISI 4340 using a 3D thermal analysis of different laser scanning patterns » dans la revue scientifique «Journal of Modeling and Numerical Simulation of Material Science». Cet article est le résultat de mes efforts ainsi que ceux des professeurs Abderrazak El Ouafi et Ahmed Chebak. En tant que premier auteur, ma contribution a consisté essentiellement sur la recherche sur l'état de l'art, le développement de la méthode, l'élaboration des modèles, l'analyse des résultats, l'exécution des tests et la rédaction de l'article. Le professeur Abderrazak El Ouafi était derrière l'idée originale de cet article. Il a contribué aussi avec le professeur Ahmed Chebak à l'orientation des travaux, le développement de la méthode, l'analyse des résultats, la rédaction et la révision de l'article.

## **2.2 NUMERICAL INVESTIGATION OF LASER SURFACE HARDENING OF AISI 4340 USING A 3D THERMAL ANALYSIS OF DIFFERENT LASER SCANNING PATTERNS**

### **2.2.1 Abstract**

Laser surface hardening is becoming one of the most successful heat treatment processes for improving wear and fatigue properties of steel parts. In this process, the heating system parameters and the material properties have important effects on the achieved hardened surface characteristics. The control of these variables using predictive modeling strategies leads to the desired surface properties without being forced to use the traditional and fastidious trial and error procedures. However, when the dimensions of the surface to be treated are larger than the cross section of the laser beam, various laser scanning patterns can be used. Due to their effects on the hardened surface properties, the attributes of the selected scanning patterns become significant variables in the process.

This paper presents numerical and experimental investigations of four scanning patterns for laser surface hardening of AISI 4340 steel. The investigations are based on exhaustive modelling and simulation efforts carried out using a 3D finite element thermal analysis and structured experimental study according to Taguchi method. The temperature distribution and the hardness profile attributes are used to evaluate the effects of heating parameters and patterns design parameters on the hardened surface characteristics. This is very useful for integrating the scanning patterns features in an efficient predictive modeling approach. The experimental calibration and validation of the 3D model is performed on a 3 kW Nd:Yag laser system using a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools.

The results reveal that the model can provide not only a consistent and accurate prediction of temperature distribution and hardness profile characteristics under variable hardening conditions but also a comprehensive and quantitative analysis of heating parameters and patterns design parameters effects. The modelling results show great concordance between predicted and measured values for the dimensions of hardened zones.

**Keywords:** Laser surface hardening, 3D thermal analysis, Finite element modelling, AISI 4340 steel, Laser scanning patterns, Taguchi method, ANOVA, Nd:YAG laser source.

### **2.2.2 Introduction**

Laser surface transformation hardening (LSTH) is a heat treatment process applied to mechanical part surfaces in order to reach specific desired mechanical properties needed to achieve specific tasks [1]. LSTH increases the wear and the fatigue resistance by improving the properties of critical surface areas through the application of concentrated, short and localized thermal energy. Compared to other surface heat treatment technologies such as induction treatment and conventional furnace treatment, LSTH is a very advantageous technique integrating good precision, high productivity, good reproducibility and highly regarded quality. Generating very localized heating zone and a fast hardening speed limiting deformation and producing a fine microstructure, LSTH is essential process in many applications [1-2].

In some applications of LSTH where the objective is to heat-treat very large surfaces, the most commonly used technique consist to use multi-track processing that involves multiple laser beam passes to cover the entire surface to be heat-treated. In addition, it is recommended to use a laser beam with the widest possible focal spot and maintain a uniform distribution of thermal intensity to produce a constant hardness profile throughout the hardened surface. However, this technique requires a very powerful laser source to reach a very wide focal spot in order to minimize the number of passes and reduce the processing time. Unfortunately, despite its advantages, this technique has a major problem. As illustrated in Figure 1, a severe hardness decrease is usually observed in the overheated areas. This is why it is essential to investigate other economical and efficient strategies than multi-track processing approach to overcome this problem [3-4].

Few studies have addressed this problem in a structured and comprehensive way. All these studies are based on the same idea which consist to produce the most uniform hardness profile for specific areas instead of aiming to heat-treat the entire surface, either by a matrix of points, matrix of lines or more complex patterns such as rotating, sinusoidal, zigzags, etc. [3-7]. What is interesting with the proposed approaches is that the input energy as well as the processing time can be gradually optimized while ensuring cost minimization. Still, it is necessary to confirm that these approaches can ensure uniform hardness distribution in order to obtain mechanical performances similar to that achieved using other surface transformation hardening techniques. Farrahi, Sistaninia, Tsuwei and Zhou [6, 7] are the more recent researchers who have worked on complex patterns as alternative to multi-track approach for laser surface transformation hardening. These studies focused on analytical modelling to analyze the behaviour of the treated surfaces according to different heat treatment patterns. Simulations using analytical models indicated that the maximum temperature reached using rotating patterns was lower than that achieved using zigzag patterns. It was also observed that the pattern frequency had a negative effect on the temperature increase. The increase of the pattern frequency leads to a decrease in the maximum temperature [3-7].



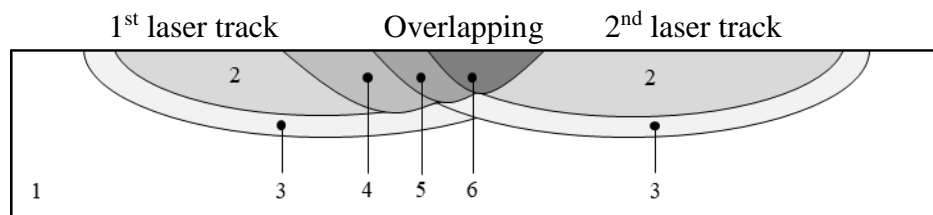


Figure 24: Illustration of the multi-track processing approach: (1) Base material, (2) Hardened zone, (3) Partial hardened zone, (4) Tempered-zone, (5) Over-tempered and partial re-hardened zone, and (6) Re-hardened zone

The achieved results are very useful to understand some specific data about the complex scanning patterns implementation. However, there is a lot of information missing. The effects of the geometrical attributes of the scanning patterns on the hardness profiles are to evaluate. The interaction between these attributes and the laser system heating parameters are to assess and analyze. The control of all process variables using predictive modeling strategies for producing the desired surface properties without being forced to use the traditional and fastidious trial and error procedures is to investigate. Numerical and experimental investigations, metallographic and microscopic analysis are needed to characterize hardness profile (*HP*), hardened depth (*HD*) and the hardened width (*HW*) produced using each scanning pattern.

This research is devoted to numerical and experimental investigations of laser surface transformation hardening of AISI 4340 steel using a 3D thermal analysis of different laser scanning patterns. The investigations are based on exhaustive modelling and simulation efforts carried out using a 3D finite element thermal analysis and structured experimental study according to Taguchi method. The temperature distribution and the hardness profile are used to evaluate the effects of heating parameters and laser scanning patterns parameters on the hardened surface characteristics. The experimental validation of the 3D model is performed on a 3 kW Nd:Yag laser system using a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools.

### 2.2.3 Mathematical formulation

#### 2.2.3.1 Thermal conduction

Several researchers developed numerical models for predicting the temperature distribution during the laser heat treatment process [8-12]. Billaud [8] established simple models to predict the hardness profile in the case of mechanical parts treatment based on 3D numerical simulations models using the finite element method. Caron-Guillemette [9]

focused its research on modelling and simulating of heat flows resulting from the interaction of a laser with steel parts, while developing a numerical function that automatically and accurately models a laser beam traversing complex surfaces, such as the teeth of a gearwheel. In fact, several other researchers approached this subject based practically on the same formulations. The differences are related to the type of laser source, the nature of displacement path, and the geometry of the part to be treated. To begin modelling this form of problem, the Fourier-Kirchhoff heat flux equation is essential to evaluate the temperature distribution according to time and specific spatial coordinates. Based on the temperature distribution and using the metallurgical transformation equations, the hardness profile and eventually the hardened depth can be easily estimated. Using the same mathematical formulation, Ashby and Easterling [12] described the metallurgical aspect of hypo eutectoid laser surface transformation of steel hypo eutectoid. The heat transfer in a solid can then be described by Equation (1):

$$\rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \times \nabla T) = E(x, y, z, t) \quad (1)$$

Where  $\rho$ ,  $C_p$  and  $\lambda$  are respectively the density, the specific heat and the thermal conductivity of the material. Cartesian coordinates are represented by  $(x, y, z)$  and time by  $t$ . The time-dependent temperature distribution  $T = T(x, y, z, t)$  is assumed to be uniform and equal to the ambient temperature initially throughout the room [ $T(x, y, z, t=0) = T_0$ ]. The term  $E(x, y, z, t)$  describes the heat source expressed using equation (2) and represents in this case a distribution of a Gaussian beam.

$$E = P \times (1 - R_C) \times \frac{A_C}{2 \times \pi \times W^2} \times e^{-\left[ \frac{[x - (x_0 + SS \times t)]^2}{2 \times W^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2 \times W^2} \right]} \times e^{-A_C \times (L_Z - z)} \quad (2)$$

Where  $W$  is the Gaussian beam radius,  $P$  is the laser power,  $R_C$  is the reflection coefficient of the surface of the material to be treated,  $A_C$  is the absorption coefficient of the laser beam power,  $SS$  is the scanning speed,  $L_Z$  is the thickness of the part and finally  $x_0$  and  $y_0$  are the laser beam center coordinates at the time  $t = 0$  s. Therefore,  $E$  expressed in  $W/m^3$  represents a Gaussian heat source that moves along the X-axis with a velocity  $SS$ . The emissivity of the surfaces as well as the phenomenon of thermal convection by the surfaces to the ambient air are given respectively by the following equations (3) and (4) where  $\varepsilon$  is the emissivity of the air,  $\sigma$  is the Boltzmann constant,  $h$  is the thermal

transfer coefficient,  $n$  is the complex refractive index,  $T$  represents the temperature distribution,  $T_{amb}$  is the ambient temperature and  $T_{ext}$  is the external temperature [12].

$$-n \times (-k \nabla T) = \varepsilon \times \sigma \times (T_{amb}^4 - T^4) \quad (3)$$

$$-n \times (-k \nabla T) = h \times (T_{ext} - T) \quad (4)$$

According to Komanduri and Hou [13], by the principle of superposition, the increase in total temperature at any point  $M$  in the surface and at any time  $t$  is given by Equation (5). Where  $E$  is the heat source expressed using equation (2),  $SS$  is the scanning speed,  $x_0$  is the radius of the moving focal spot,  $x_i$  is the radius of a segmental focal spot,  $a$  is the thermal diffusivity of the medium ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $\lambda$  is the thermal conductivity of the material,  $I_0$  is the modified Bessel function of first kind order zero,  $\omega$  is a dimensionless number varying from 0 to  $SS^2 t / 4a$ ,  $\theta$  is the tilt angle and  $X, Y, Z$  are the coordinates of any point  $M$  in a moving coordinate system where the temperature rise is concerned [13]. This equation is very useful to evaluate the surface temperature distribution of each trajectory performed during the laser hardening process.

$$T_M = \frac{9 E SS}{4 \lambda a \pi^{1.5} x_0^2} \int_{x_i=0}^{x_i=x_0} e^{-\left(\frac{3x_i}{x_0}\right)^2} x_i dx_i \times \int_{\omega=0}^{SS^2 t / 4a} \frac{d\omega}{\omega^{1.5}} \times \exp\left(-\omega - \frac{u^2}{4\omega}\right) \times I_0 \left[ \frac{x_i V^2}{2\omega} \sqrt{\left(X + \frac{2\omega}{V}\right)^2 + Y^2} \right] \quad (5)$$

With: 
$$V = SS / 2a \quad (5.1)$$

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{P \cos \theta} d\theta \quad (5.2)$$

$$u = (x_i^2 + X^2 + Y^2 + Z^2) \times V \quad (5.3)$$

### 2.2.3.2 Metallurgical transformation

In equilibrium, austenite formation generally begins at the temperature delimited by the  $Ac_1$  curve found in the iron-carbon phase diagram. From this point, the carbon contained in the perlite grains becomes in solid solution, homogenizes in the perlite before migrating to the ferrite grains, which contain a small percentage of carbon. The diffusivity of carbon is approximately  $1 \times 10^{-5} e^{-9.0/T}$   $\text{m}^2/\text{s}$  in austenite and  $6 \times 10^{-5} e^{-5.3/T}$   $\text{m}^2/\text{s}$  in ferrite [14-15]. In rapid cooling, only austenite regions containing sufficient carbon will be transformed into martensite. Generally, it is well known that the heating rate greatly affects the formation of austenite and its homogenization. Therefore, it is necessary to

allow sufficient time for the carbon to migrate homogeneously into the austenite, otherwise the transformation will not be uniform and may contain mixed zones in the hardened area.

The time required for carbon diffusion is related to the distance it must travel, i.e. the initial microstructure of the steel. The formation of martensite requires that the cooling of the austenite must respect a well-defined rate. Unlike austenite, which absorbs carbon from neighboring regions, martensite is produced by atoms displacements to form crystal structure that traps carbon easily (interstitial sites). This crystalline arrangement with a lower density and higher volume than austenite is at the source of the geometric deformations produced by the transformation hardening. The increase in volume with about 4% according to Steen *et al.* [14], produce some desired residual compressive stresses for certain mechanical loading situations [16]. During the heating cycle, temperature peaks affect the level of the structural change in the material. This phenomenon is expressed by the equation of kinetic force (6).

$$I = \alpha \times \tau \times e^{\left[ \frac{-Q}{R \times T_p} \right]} dt \quad (6)$$

Where  $Q$  is the activation energy of the structural transformation,  $R$  is the gas constant,  $T_p$  is the temperature peak at a considered temperature,  $\alpha$  is the thermal diffusivity and  $\tau$  is the time constant [12]. The terms  $\alpha$  and  $\tau$  are determined by Equations (7) and (8).

$$\alpha = \sqrt[3]{\left[ \frac{(R \times T_p)}{Q} \right]} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{[(1-R_c) \times P]}{\left[ \frac{2 \times \pi \times \lambda \times e^l}{V_0 \times (T_p - T_0)} \right]} \quad (8)$$

Where  $T_0$  is the initial temperature,  $R_c$  is the reflection coefficient and  $\lambda$  is the thermal conductivity of the material. The spacing of the perlite layers has been described by Ashby and Easterling [12] using Equation (9).

$$I^2 = 2 \times D_0 \times \alpha \times \tau \times e^{\left( \frac{-Q}{R \times T_p} \right)} \quad (9)$$

In a heating cycle where the temperature depends on time, this spacing will be sufficient for the total transformation of the perlite into austenite [12, 16].  $D_0$  is the constant of carbon diffusion in ferrite. Indeed, the austenite is obtained at the same carbon content as perlite ( $C_e=0.8\%$ ). At temperature  $Ac_1$ , the austenite volume fraction becomes the volume fraction  $f_i$  previously occupied by the perlite colonies. This represents the minimum volume fraction of martensite.

$$f_i = (C-C_f)/(0.8-C_f) = C/0.8 \quad (10)$$

Where  $C$  is the carbon content in steel and  $C_f$  is the carbon content in ferrite which is negligible in this case. According to the time diagram (TTT), the maximum allowable martensitic fraction is:

$$\begin{aligned} f_m &= 0 & \text{if } T_p < AC_1 \\ f_m &= f_i + (1-f_i) \times \frac{(T_p - AC_1)}{(AC_3 - AC_1)} & \text{if } AC_1 \leq T_p \leq AC_3 \\ f_m &= 1 & \text{if } T_p > AC_3 \end{aligned} \quad (11)$$

Furthermore, the volume fraction of the martensite is then given by Equation (12) with  $C_c$  is the critical carbon content,  $D_0$  is the pre-exponential for diffusion of carbon and  $g$  is the average grain size.

$$f = f_m - (f_m - f_i) \times e^{\left[ \frac{(12 \times f_i^{2/3})}{(g \times \sqrt{\pi})} \times \ln\left(\frac{C_e}{2 \times C_c}\right) \times \sqrt{D_0 \times t} \right]} \quad (12)$$

Finally, the hardness can be determined by Equation (13) with  $H_m$  and  $H_{f+p}$  are two terms given by Maynier's equations that take into account the cooling rate and material composition [8,12].

$$H = (f \times H_m) + (1-f) \times H_{f+p} \quad (13)$$

### 2.2.3.3 Laser beam displacement

To perform each desired scanning pattern, the laser beam displacement is controlled by specific parametric equations reflecting the desired laser beam path. Figure 25 presents an illustration of the selected scanning patterns. The patterns parametric

equations are presented in Table 10. In these equations,  $a_{mp}$  represents the amplitude,  $d$  the distance between the circle center and the point of the trochoid pattern,  $SS$  the scanning speed,  $t$  the time and  $f_r$  the frequency.

## 2.2.4 Numerical simulation parameters and conditions

### 2.2.4.1 Simulation parameters

Since the material properties change significantly with temperature, it is recognized that the numerical models describe the material transformation process better than analytical models. Generally, analytical models give a preliminary approximation of the phenomenon, then the numerical approach come often to confirm the results. Based on material properties and the previously represented equations, extensive simulations are performed using various scanning patterns applied on 4340 steel prismatic parts (60 mm x 6 mm x 5 mm). The thickness of the part to be treated must be large enough in order to not affect the temperature profile and to provide cooling cycle while allowing metallurgical transformation [5]. Table 11 presents the chemical composition of AISI 4340 steel and Table 12 illustrates different physicochemical properties.

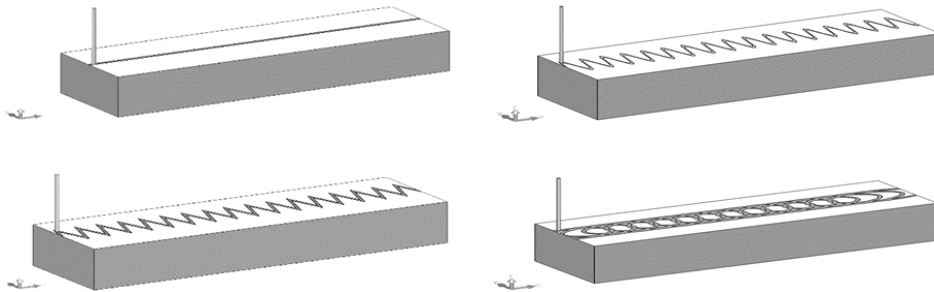


Figure 25: Illustration of the used laser scanning patterns: (a) Linear, (b) Sinusoidal, (c) triangular and (d) Trochoid

In this study, the numerical investigation is based on a 3D finite element thermal analysis. This modelling and simulation approach provides an understanding of the behaviour of material properties as a function of processing temperature. To simplify the model and reduce the calculation time, the material is considered homogeneous and isotropic, the physicochemical properties are determined at thermodynamic equilibrium, the ambient temperature is set at 20 °C (about 293 K) and the maximum temperature must not exceed 1400 °C. In addition, the simulations take into account the emissivity of the

surfaces as well as the phenomenon of thermal convection by the surfaces to the ambient air.

Table 10: The parametric equations of different trajectories

Pattern	Parametric equations
Triangular	$X_{00}=X_0+(SS \times t)$
	$Y_{00}=Y_0+\left(\text{amp} \times \frac{2}{\pi}\right) \times \text{asin}\left(\cos\left(\frac{(t \times 5 \times \pi \times \text{fr})}{60}\right)\right)$
Sinusoidal	$X_{00}=X_0+(SS \times t)$
	$Y_{00}=Y_0+\text{amp} \times \sin\left(\frac{t \times 5 \times \pi \times \text{fr}}{60}\right)$
Trochoid	$X_{00}=X_0+(d \times t \times 35)+(SS \times \sin(t \times 35))$
	$Y_{00}=Y_0+(\text{amp} \times \cos(t \times 35))$

Table 11: Chemical composition of AISI 4340 steel

Component	Fe	Ni	Cr	Mn	C	Mo	Si	S	P	Ce	Cf
%	95.71	1.83	0.81	0.7	0.4	0.25	0.23	0.04	0.03	0.8	0.01

Table 12: Physicochemical properties of AISI 4340 steel

Properties	Symbol	Unit	Value
Eutectoid temperature	$A_{c1}$	K	996
Austenization temperature	$A_{c3}$	K	1053
Melting temperature	$T_f$	K	1700.15
Reflection coefficient	$R_c$	-	0.6
Absorptivity of the material	$A_c$	$\text{m}^{-1}$	800
Austenite grain size	$g$	$\mu\text{m}$	10
Pre-exponential for the carbon diffusion	$D_0$	$\text{m}^2/\text{s}$	$6 \times 10^{-5}$
Activation energy for carbon diffusion in ferrite	$Q$	KJ/mol	80
Gas constant	$R$	J/mol.K	8.314

The main parameters used in this numerical investigations are laser power ( $P$ ), laser source displacement speed ( $SS$ ), frequency ( $fr$ ) and amplitude ( $amp$ ). The standard parameters are the reflection coefficient and the absorption coefficient. The evaluation of

the temperature distribution for each pattern as well as its effect on the hardened surface characteristics are related to the patterns parameters summarized in Table 10. In addition, Table 13 presents the specific simulation parameters for selected scanning patterns. In this table,  $X_0$  and  $Y_0$  are the coordinates of the start point,  $x_0$  and  $y_0$  are the laser beam radius,  $T_{step}$  is the time step for discretizing of model,  $T_{end}$  is the time end of the simulation, amp is the amplitude and b is the correction coefficient used from the model calibration.

Figure 26 shows the evolution of the thermal conductivity ( $\lambda$ ) and the specific heat ( $C_p$ ) as a function of the temperature evolution. These two properties are expressed by Equations (14) and (15) respectively. The variables constituting the parametric equation of the heat source are defined in Table 13 and expressed using Equation (16). The coefficient b is a model correction coefficient obtained by multiple linear regression as function of laser power and scanning speed.

$$\lambda(T) = \begin{cases} 45.06T + 0.000786T - 0.000025T^2 & T \leq 1048,15 \text{ K} \\ 30.8 & T \geq 1048,15 \text{ K} \end{cases} \quad (14)$$

$$C_p(T) = \begin{cases} 400.3 + 0.5317T & T \leq 1073,15^\circ\text{K} \\ -6270 + 8.869T & 1073,15^\circ\text{K} \leq T \leq 1160,15^\circ\text{K} \\ 11754 - 11.44T & 1160,15^\circ\text{K} \leq T \leq 1248,15^\circ\text{K} \\ 600 & T \geq 1248,15^\circ\text{K} \end{cases} \quad (15)$$

$$Q_{in} = P \times (1 - R_c) \times A_c \times b \times \left( \frac{1}{2 \times \pi \times x_0 \times y_0} \right) \times \text{an1}(X, X_{00}, x_0, Y, Y_{00}, y_0) \times \exp(-A_c \times \text{abs}(L_s - Z)) \quad (16)$$

#### 2.2.4.2 Mesh stability study

The convergence study is necessary in all simulation problems because it increases the results consistency, ensures the model validity, and saves a lot of computing time. The convergence study consists of creating an initial mesh using a reasonable mesh size, computing and analysing the first results, then decreasing the mesh size step by step and evaluating the current results by comparing them to previous iteration results. The points used for the evaluation of the surface temperature are uniformly and symmetrically distributed on both sides of the laser beam path. Three points ( $P_1$ ,  $P_2$  and  $P_3$ ) are fixed at  $x = 30$  mm and  $z = 5$  mm, and  $y = 2, 3$  and  $4$  mm. Respectively at these points, three temperatures  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  are measured for different mesh sizes. Given the symmetrical aspect of the distribution of points, the temperature  $T_2$  must be higher than  $T_1$  and  $T_3$  since



it is a centered position, while  $T_1$  and  $T_3$  must be equal. After several simulations, the convergence curves show that the temperatures become stable between the 0.016 and 0.32 mm mesh size. Outside this range, the temperatures fluctuate due to accuracy and truncation errors.

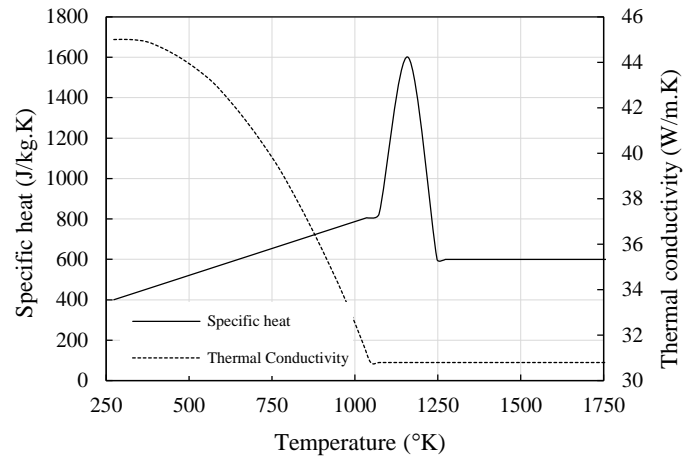


Figure 26: Evolution of specific heat and thermal conductivity as a function of temperature

Table 13: Simulation parameters of the three patterns

Parameters	Patterns		
	Sinusoidal	Triangular	Trochoid
$X_0$	0	0	0
$Y_0$	1/2	1/2	1/2
$x_0$ [mm]	0.255	0.255	0.255
$y_0$ [mm]	0.255	0.255	0.255
$P$ [W]	800	800	800
$T_{step}$	$T_{end}/100$	$T_{end}/100$	$T_{end}/100$
$T_{end}$	L/SS	L/SS	L/SS
SS [mm/s]	30	30	60
Amp [mm]	1	1	1
d [mm]	-	-	0.6
fr [Hz]	250	250	-
$b$	$3.042 - 0.00383 \cdot P + 0.0425 \cdot SS$		

The selected mesh size of 0.016 mm is a reasonable compromise to achieve realistic precision without requiring excessive computing resources. This choice is also effective and well adapted to the three scanning patterns to be simulated. However, to improve the results accuracy smaller mesh size and higher mesh density are used in the

part central areas. Figure 27 illustrates the selected final mesh size and Figure 28 shows the effect of mesh size on the temperatures variation.

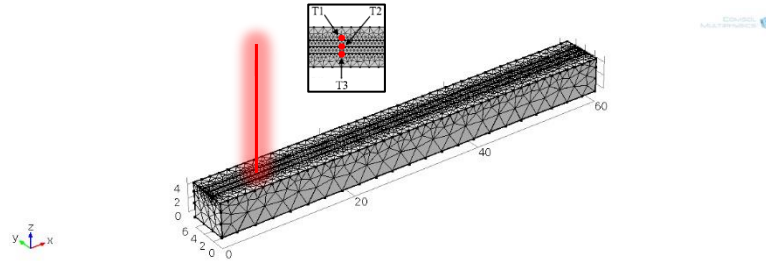


Figure 27: Illustration of the selected final mesh size

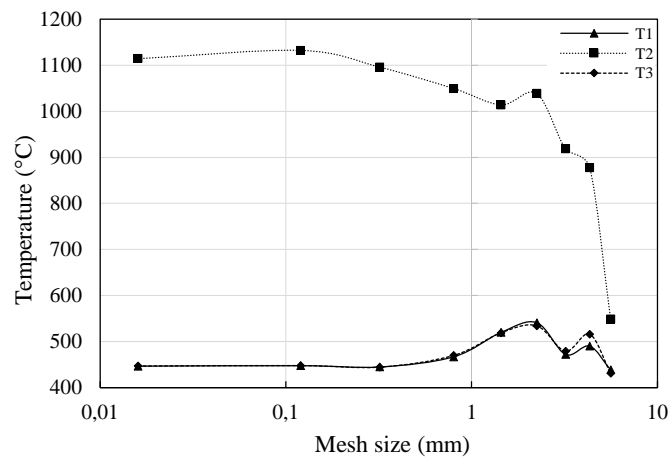


Figure 28: Effect of mesh size on the achieved results

### 2.2.5 Experimental validation

A series of validation tests are carried out according to structured experimental design in order to evaluate the hardness profile obtained by each scanning pattern. The experiments are done on AISI 4340 steel plates (60 mm x 6 mm x 5 mm) with an initial hardness of 25 to 30 HRC. The surface hardening is performed using an IPG YLS-3000-ST2 fiber laser with a maximum power of 3 kW powered by an ND: YAG laser source mounted on a six-axis Fanuc M-710IC robot. The used experimental setup is shown in Figure 29. For each scanning pattern, the appropriate laser beam displacement is ensured by specific path program implemented in the robot control.

As indicated in the Table 14, three levels are selected for each of the laser parameters (laser power and scanning speed). These parameters and levels are fixed

following a series of preliminary tests [17]. For the 36 tests performed (four separated  $L_9$  for the four scanning patterns) are the same as those used in the numerical simulations.



Figure 29: The laser cell used for the experimental validation

The measured hardened surface characteristics are the hardened depth ( $HD$ ) and the hardened width ( $HW$ ) for the different tests and different scanning patterns. When the hardening process is completed, the parts are cut, cleaned and polished for hardness measurement. The micro hardness measurements are taken using the Clemex machine according to series of micro indentations with a  $100\ \mu\text{m}$  pitch between the indents along a vertical and horizontal axis. In addition, the hardened depth and hardened width measurements are performed using a profile projector after chemical attacks of the samples by Nital solution (95% ethanol and 5% nitric acid). Globally, the produced hardened surface and the associated hardness profiles present acceptable visual characteristics, nevertheless some discontinuities observed in the case of certain samples. Figure 30 presents typical hardness profiles achieved using a power of 800 W and a speed of 20 mm/s.

The achieved results for the hardened depth and the hardened width for different scanning patterns are characterized by a good concordance between numerical

simulations and experimental results. Table 15 illustrates the numerical and experimental results of the hardened depth and the hardened width for the various performed tests.

Table 14: Experimental design for testing used for each scanning pattern

Test	Power (W)	Scanning speed (mm/s)
1	500	20
2	500	30
3	500	40
4	650	20
5	650	30
6	650	40
7	800	20
8	800	30
9	800	40

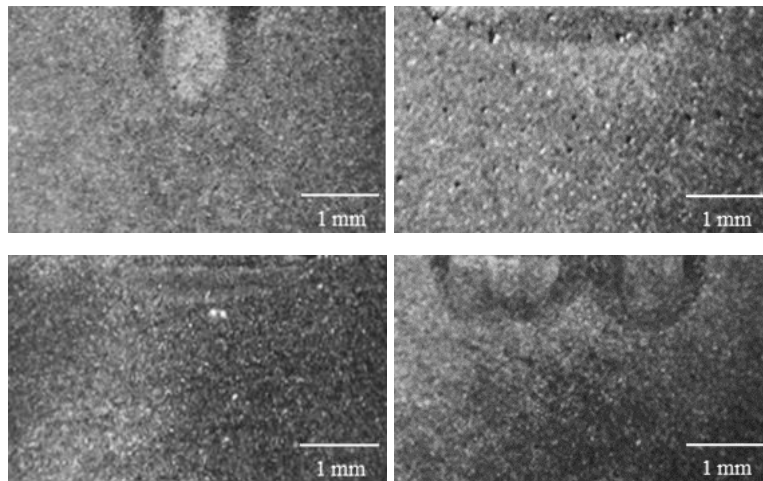
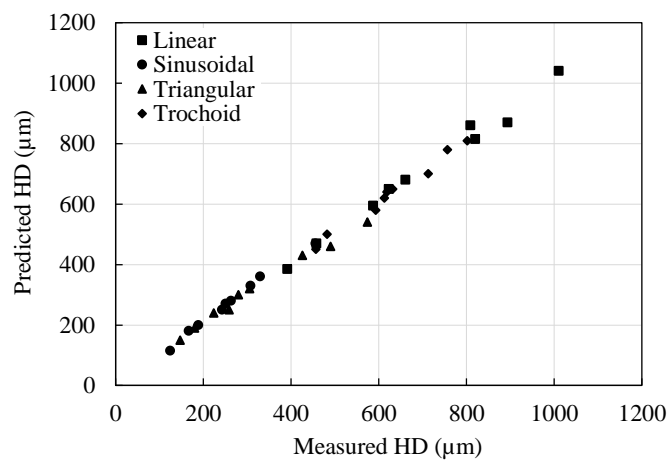
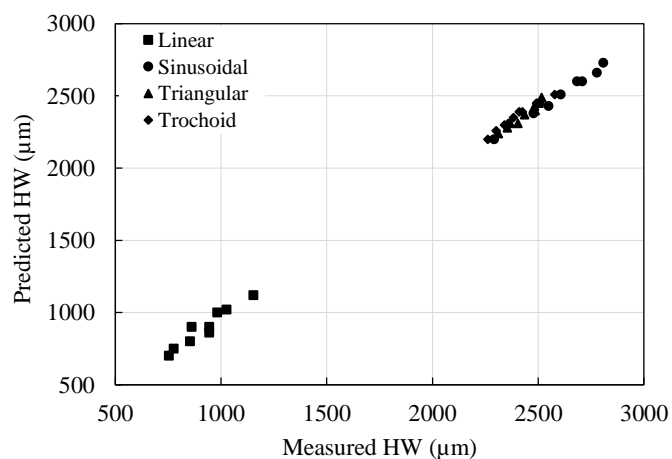


Figure 30: Typical hardened zones using a power of 800 W and a scanning speed of 20 mm/s for linear, sinusoidal, triangular and trochoid scanning patterns respectively

Figure 31 and Figure 32 shows a comparison between experimental and numerical results for *HD* and *HW* respectively. These results reveal globally that the developed numerical models can estimate *HD* and *HW* accurately with maximum errors not exceeding 9.1%. The model accuracy is confirmed by coefficients of determination ( $R^2$ ) between 95 and 98%. The maximum error is observed in the case of linear and sinusoidal scanning patterns. The trochoid pattern presents the best results with 3.7, 2.3 and 1.00 % as maximum, average and minimum errors respectively.

Table 15: Experimental validation-results

Predicted Characteristics ( $\mu\text{m}$ )	Relative Errors (%)	Scanning patterns			
		Linear	Sinusoidal	Triangular	Trochoid
<b>Hardened depth: <math>HD</math></b>	Minimum	0.60%	2.90%	0.90%	1.00%
	Maximum	6.30%	9.10%	7.10%	3.70%
	Average	2.83%	6.43%	4.76%	2.28%
<b>Hardened width: <math>HW</math></b>	Minimum	0.70%	2.30%	1.00%	0.80%
	Maximum	9.10%	4.70%	4.00%	2.70%
	Average	4.52%	3.67%	2.68%	1.81%

Figure 31: Scatter plot - Measured and simulated  $HD$  for the four scanning patternsFigure 32: Scatter plot - Measured and simulated  $HW$  for the four scanning patterns

Moreover, ANOVA is applied to the simulation data and the obtained results are compared to those found by ANOVA applied to the experimental data. The comparison

of the parameters contribution between experimentation and simulation data for all considered scanning patterns is presented in Table 16. One can observe that the laser parameters effects, in term of percentage contributions of the (% C), on the variation of simulated  $HD$  and  $HW$  are practically the same as in the case of the experimental data excepting for  $HW$  in the case of the triangular scanning pattern.

Table 16: Comparison of the parameters contribution between experimental and simulated  $HD$  and  $HW$  for the four moving patterns

Scanning patterns	Variation Sources	(% Contribution)			
		Measured $HD$	Predicted $HD$	Measured $HW$	Predicted $HW$
<b>Linear</b>	$P$	78.20	71.10	42.91	52.56
	$SS$	20.69	27.23	48.33	45.12
	$P*SS$	0.12	0.11	0.06	0.61
	Error	0.98	1.56	8.70	1.71
<b>Sinusoidal</b>	$P$	45.27	45.80	15.61	24.01
	$SS$	50.11	51.53	80.43	73.14
	$P*SS$	1.44	0.34	1.52	1.71
	Error	3.18	2.33	2.45	1.13
<b>Triangular</b>	$P$	51.15	59.35	10.42	22.83
	$SS$	41.18	35.32	86.31	75.76
	$P*SS$	3.60	2.62	0.39	0.17
	Error	4.07	2.71	2.87	1.23
<b>Trochoid</b>	$P$	58.20	61.06	22.65	23.22
	$SS$	32.48	29.56	73.07	76.29
	$P*SS$	1.06	0.81	1.05	0.03
	Error	8.26	8.57	3.23	0.45

The largest difference between experimental and simulated results is about 12% observed for the power contribution in  $HW$  variation when using triangular scanning pattern. This is due to some  $HW$  measurement errors and probably to the fact of not considering the effect of the laser beam diameter variation in the simulations. The evaluation of the laser power and scanning speed interaction shows also non-significant effects as established in the experimentation investigations [17]. The contributions of various interactions do not exceed 5 %. These results are confirmed by the graphs of effects of the laser parameters on  $HD$  and  $HW$  presented in Figures 33-36. An F-test is also conducted to confirm the laser parameter contributions and effects significance. Therefore, the proposed numerical model is sufficiently accurate for been used in this

numerical investigations and ultimately to generate additional data that can be very useful to integrate in an eventual predictive modelling approach.

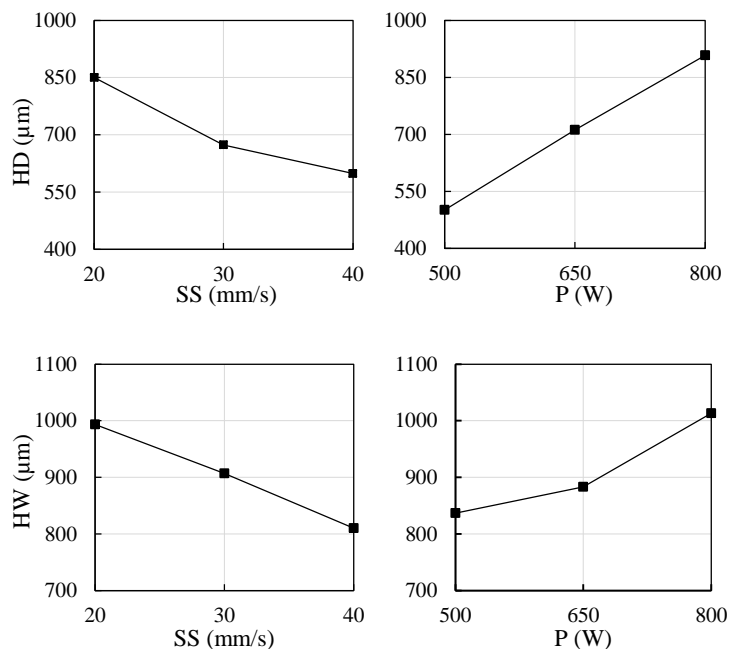


Figure 33: Effect of the laser parameters on *HD* and *HW* variations for linear scanning pattern

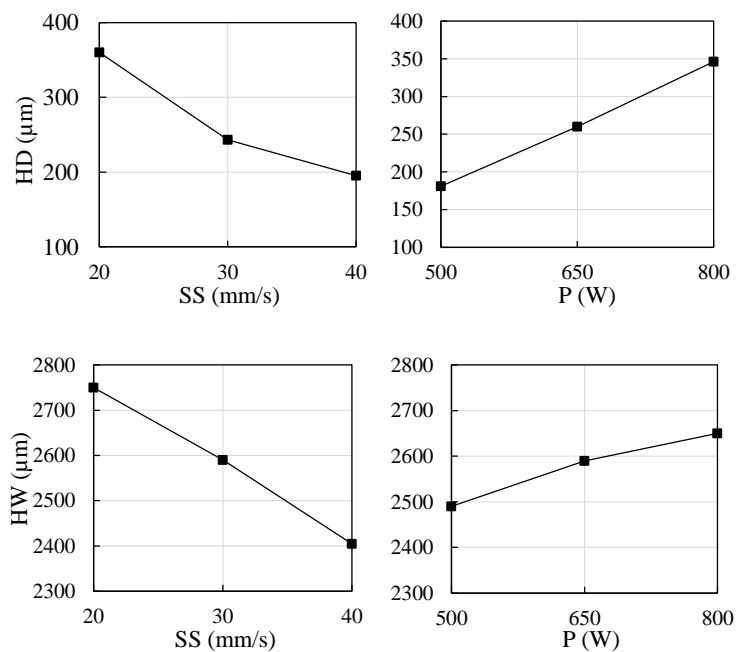


Figure 34: Effect of the laser parameters on *HD* and *HW* variations for sinusoidal scanning pattern

### 2.2.6 Simulation results and discussions

Numerous simulations are performed under various heating parameters and conditions using different scanning patterns. The main objective of these exhaustive simulation efforts is to collect sufficient data to evaluate the effects of heating parameters and patterns design parameters on the hardened surface characteristics in cases not evaluated in the in the very few conducted experiments.

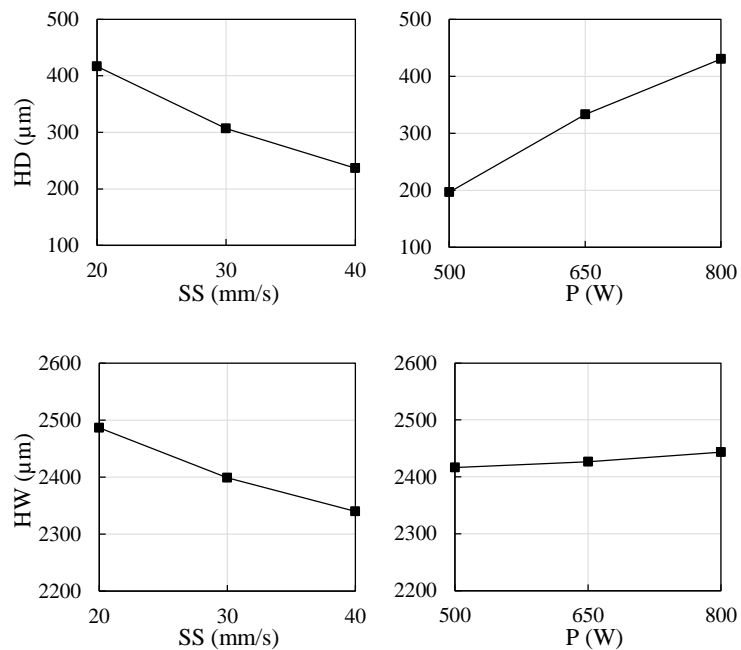
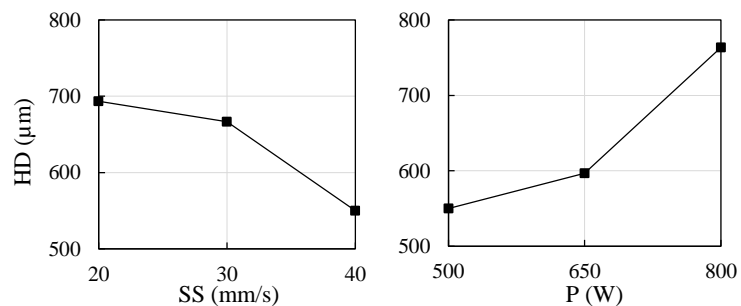


Figure 35: Effect of the laser parameters on  $HD$  and  $HW$  variations for triangular scanning pattern





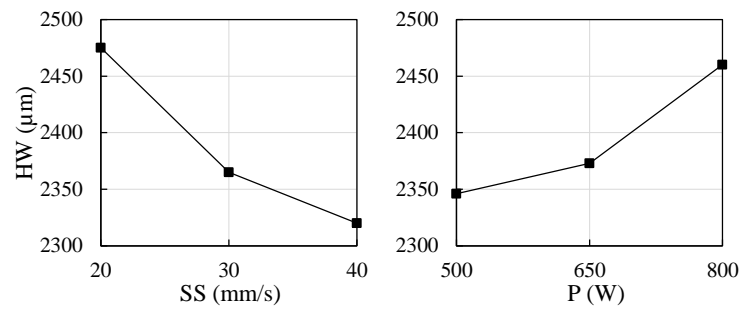


Figure 36: Effect of the laser parameters on  $HD$  and  $HW$  variations for trochoid scanning pattern

This will significantly help to identify the most appropriate scanning patterns in conjunction with heating parameters to reach a uniform temperature distribution and maximum treated surface dimensions. Additional simulations using a linear trajectory are performed to evaluate the results accomplished by different scanning patterns compared to the traditional single tract laser hardening.

As anticipated, the simulation results show that the temperature is always at its maximum under the laser beam spot and decreases progressively as the spot moves away. Outside the focal spot, the part absorbs the heat by conduction and the temperature drops gradually. In addition, some of the heat is lost by convection in the ambient air and by radiation through the room. However, due to its good thermal absorption coefficient, the material absorbs most of the heat emitted by the laser. The part volume plays a very important role with a direct cooling of the heated areas after reaching the austenization temperature without the need for forced convection [13]. These observations are illustrated in Figure 37. It was also observed that under the same heating parameters, the temperature distribution is related to the used scanning patterns. Consequently, the dimension of the treated zone depends on heating parameters and scanning pattern design parameters.

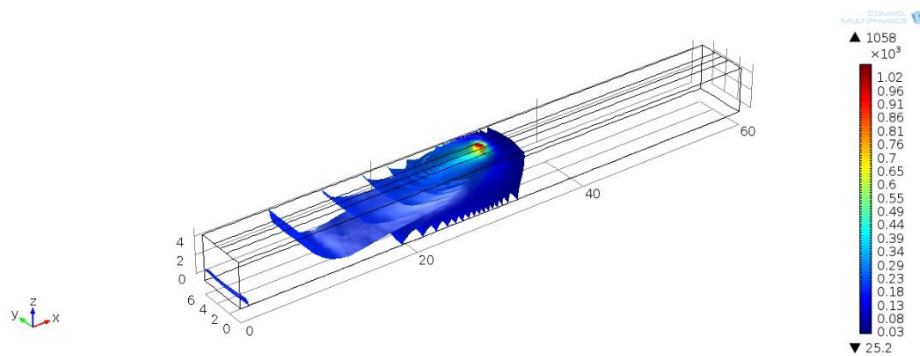


Figure 37: Typical isothermal contours for sinusoidal pattern

Figure 38 shows the maximum temperature achieved by different scanning patterns as a function of y-axis observed in the section located at  $x = (5, 30 \text{ and } 55 \text{ mm})$ . These temperature curves are obtained using the same heating parameters in order to compare the effect of the scanning patterns on the temperature distribution. This temperature distribution visualization looks like a cross section that represents the width of the treated zone and the reached maximum temperature represents practically the hardened depth. According to this figure, it appears that the sinusoidal pattern produces the largest treated width. The highest maximum temperature is achieved using the linear pattern that concentrates the heat flow in restricted area in the middle of the part. Linear pattern generates a temperature of about  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  exceeding the melting temperature of 4340 steel. At  $y=2$  and  $4$  and along x-axis, the sinusoidal path presents the highest temperature magnitude (about  $1100^\circ\text{C}$ ) but the lowest temperature in the part center ( $y=3$ ) with (about  $900^\circ\text{C}$ ). The temperatures reached using triangular and trochoid patterns are equivalent with some variations of the order of  $30$  to  $100^\circ\text{C}$ . The temperature distribution is practically symmetrical.

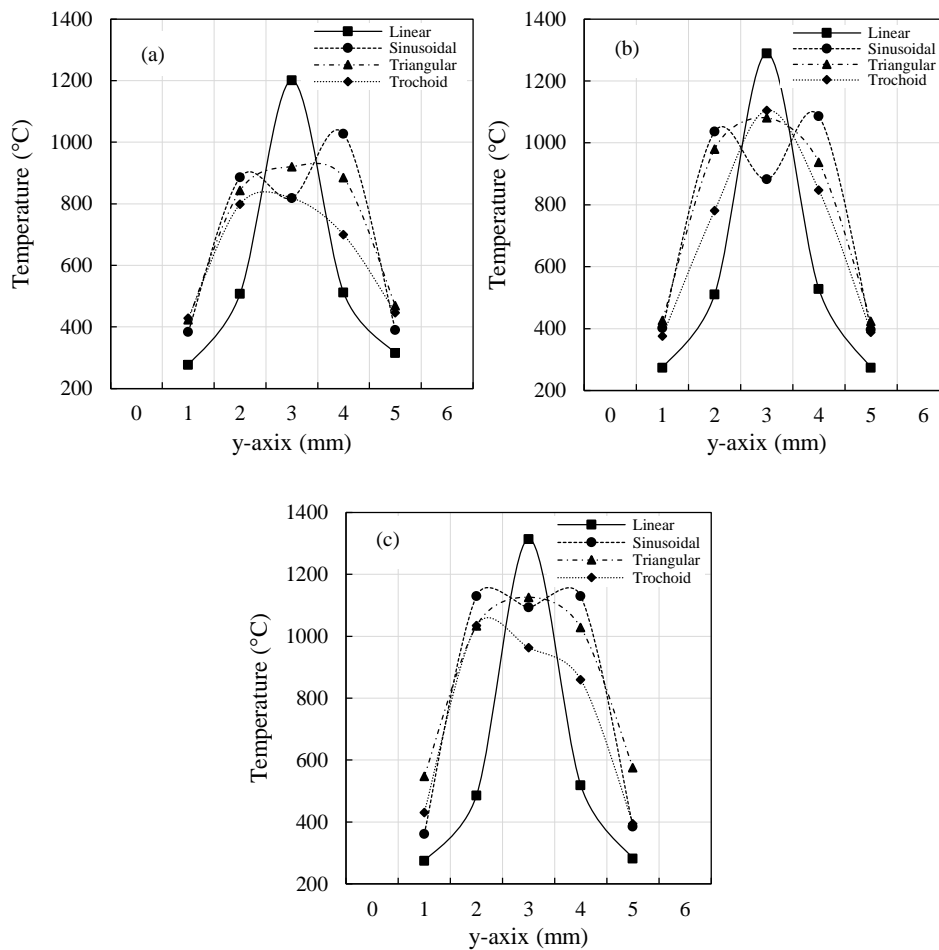


Figure 38: Typical surface temperature evaluation for different scanning patterns at (a)  $x = 5\text{ mm}$ , (b)  $x = 30\text{ mm}$  and (c)  $x = 55\text{ mm}$

Figure 39 shows the temperature distribution over the entire surface. This helps to not only detect the variation of the heat flow distribution, but also to compare the temperature distribution uniformity for different scanning patterns and to visualize the maximum temperature reached at each point of the surface. Consequently, the dimensions of the treated zone can be estimated accurately. These figures reveal that the linear pattern is characterized by the most uniform distribution longitudinally but heat treat only a limited portion of the surface. In the case of linear multi-tracks pattern, the distribution can be improved but remains irregular. The sinusoidal pattern produces a relatively uniform temperature distribution longitudinally similar to that generated by the triangular pattern. The trochoid pattern produce a temperature distribution characterized by some periodicity in temperature peaks due to the intersection points in the laser beam path. Some points of the surface are heated two times.

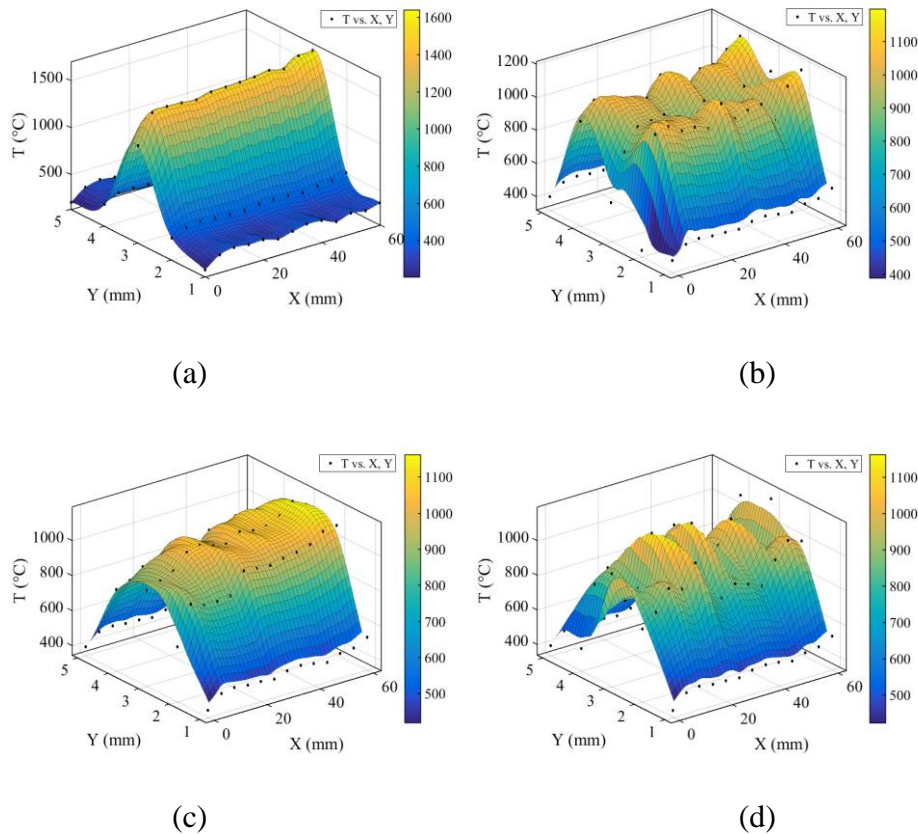


Figure 39: Temperature distribution on the heat-treated surface for different patterns (a) Linear, (b) Sinusoidal, (c) Triangular and (d) Trochoid

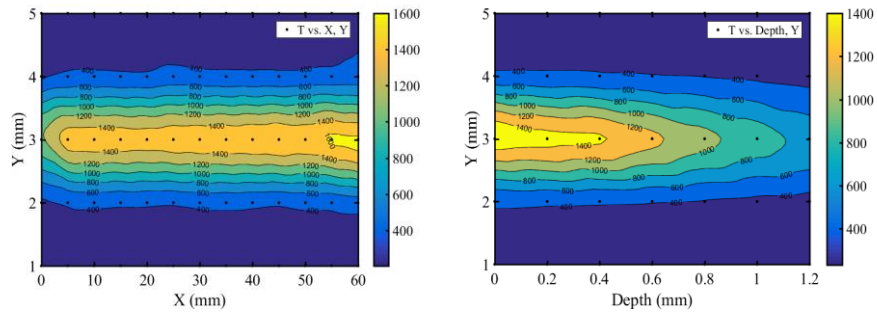
The sinusoidal pattern produces a good distribution with a relatively high temperature that covers the majority of the treated surface offering a maximum width compared to other patterns under the same hardening conditions ( $P=800$  W,  $SS=20$  mm/s). For the triangular pattern, the heat flux is more concentrated in the part centerline and the temperature remains relatively low at the margins ( $y=2$  and  $4$  mm). The trochoid pattern is characterized by temperature peaks generated by the double passage of the laser beam over some points on the treated surface, leading to a non-uniform and non-symmetrical distribution of the heat. Generally, these temperature peaks are undesirable since they can usually lead to melting zone and surface deformation.

The identification of the temperature distribution on the surface indicates the delimitation of the hardened zone and consequently allows to estimate the hardened depth and the hardened width for each scanning pattern. Figure 40 shows contour plots representing the temperature distributions according to the part surface points coordinates and as a function of the part cross-section points coordinates. These plots provide a good

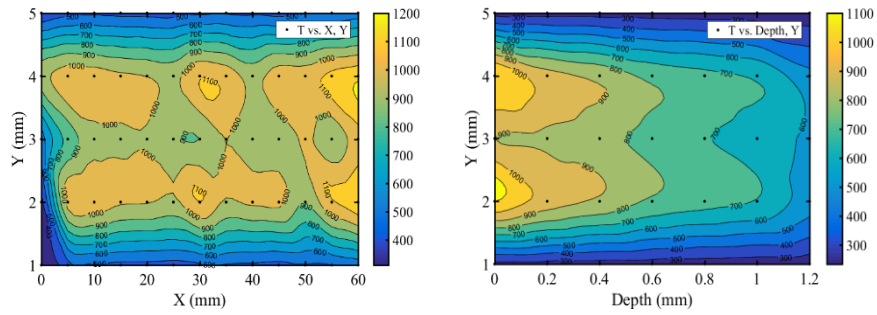
indication how the temperature is distributed not only on the surface but also on different depths. This allows furthermore to estimate the volume of transformed material using the same energy for different scanning patterns. Consequently,  $HD$  and  $HW$  can be estimated easily. Figure 40 confirm the results observed from Figure 39. Although sinusoidal pattern does not produce a transformed material volume as high as that produced using the trochoid pattern (105 vs 108 mm<sup>3</sup>), it presents the best compromise in terms of  $HD$  and  $HW$ . Indeed, sinusoidal pattern produces a relatively uniform temperature distribution with a reasonably high temperature covering the entire surface and offering the maximum width compared to other patterns under the same processing conditions.

For specific applications, maximizing the surface of the hardened zone requires the selection of the appropriate scanning pattern. An adequate scanning pattern is the one that produce a maximum uniform hardened width while respecting a minimum limit of hardened depth. In such a case, if a minimum is set for  $HD$ , the  $HW/HD$  ratio can be used as an indicator to evaluate the hardened zone surface according to the laser parameters for evaluating different scanning patterns.  $HW/HD$  ratio can provide also useful indication on how the generated heat is absorbed by the surface. Table 17 presents the  $HW/HD$  ratio for various simulated combination of laser parameters and scanning patterns. It can be observed that the general average  $HW/HD$  ratio is higher than that calculated excluding tests where  $HD$  is lower than 200  $\mu\text{m}$ . Sinusoidal and triangular scanning patterns present the highest  $HW/HD$  ratio allowing to achieve the largest hardened surfaces. With high  $HD$  and small  $HW$ , linear pattern produces a low and relatively constant  $HW/HD$  ratio. Trochoid pattern represents an improved version of linear pattern with approximatively the same  $HD$  but with a  $HW$  more than 2.5 times higher.

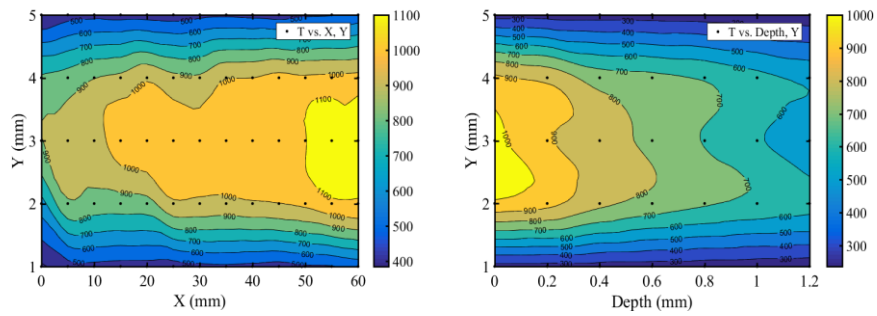
Then, if the laser parameters can be set to control a constant minimal  $HD$  to 200  $\mu\text{m}$ , by adopting the maximum ratio,  $HW$  can reach a minimum more than 3500  $\mu\text{m}$  for sinusoidal and triangular scanning pattern. If the total generated heating energy is adjusted to maintain a constant minimal  $HD$ ,  $HW$  can reach higher values.



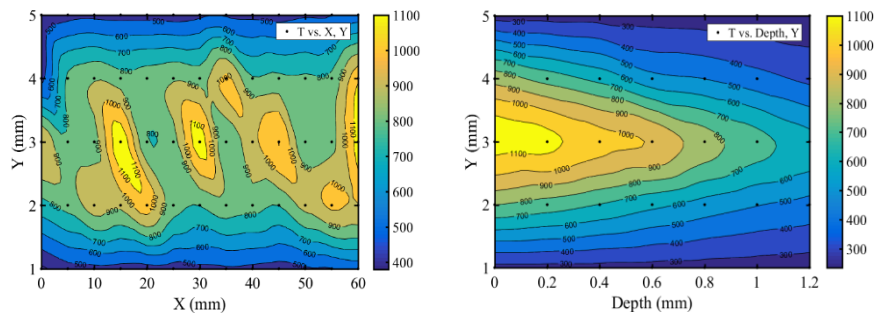
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 40: Contour plots representing the temperature distribution for different laser scanning patterns (a) Linear, (b) Sinusoidal, (c) Triangular and (d) Trochoid

Table 17: *HW/HD* ratio for various combination of laser parameters and scanning patterns

	<i>HW/HD</i> ratio for various scanning patterns			
	Linear	Sinusoidal	Triangular	Trochoid
Minimum	1.06	5.81	4.61	3.06
Maximum	1.90	19.13	14.93	4.89
Average	1.31	9.94	8.06	3.78
Average excluding <i>HD</i> < 200 $\mu\text{m}$	1.31	8.97	7.35	3.78

### 2.2.7 Conclusion

This paper presents numerical and experimental investigations of laser surface hardening of AISI 4340 using four different laser scanning patterns. The investigations are based on exhaustive modelling and simulation efforts carried out using a 3D finite element thermal analysis and structured experimental study according to Taguchi method. The temperature distribution and the hardness profile attributes are used to evaluate the effects of heating parameters, scanning patterns design parameters and their interactions on the hardened surface characteristics. The experimental calibration and validation of the 3D model is performed on a 3 kW Nd:Yag laser system using a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools. Extensive numerical simulations carried out through 3D numerical model reveal that the developed numerical models can estimate the hardened surface characteristics accurately with maximum errors not exceeding 9.1%. The model accuracy is confirmed by coefficients of determination between 95 and 98%. The maximum error is observed in the case of linear and sinusoidal scanning patterns. The Trochoid pattern presents the best results with 3.7, 2.3 and 1.00 % as maximum, average and minimum errors respectively. The observed deviations originate principally from experimental errors as well as from some assumptions considered during the model building. Globally, the results demonstrate that the numerical simulation can effectively lead to a consistent and accurate hardened surface characteristics estimation model under variable heating parameters and scanning patterns. The proposed model provides an appropriate framework for comprehensive qualitative and quantitative analysis of the effects of the scanning patterns design parameters on the hardened zone characteristics. With the encouraging results achieved using this numerical

model, the laser surface transformation hardening using various laser-scanning patterns will be the subject of additional and exhaustive investigations to generate more numerical simulation and experimental data in order to develop an efficient predictive modelling approach.

## Nomenclature

<p>Ac: Absorption coefficient, <math>m^{-1}</math>,            Ac<sub>1</sub>: Heating temperature at point A<sub>1</sub>, °C,            Ac<sub>3</sub>: Heating temperature at point A<sub>3</sub>, °C,            Cp: Specific heat, <math>J.kg^{-1}.K^{-1}</math>,            d: length of the line, m,            fr: frequency, Hz,            h: Thermal transfer coef., <math>W.m^{-2}.K^{-1}</math>,            K: Thermal conductivity air, <math>W.m^{-1}.K^{-1}</math>,            L: piece length, m,            l: piece width, m,            I: spacing of the perlite layers, m,            Lz: piece thickness, m,            P: Laser power, W,</p>	<p>Rc: reflection coefficient of the material,            T: Temperature of the material, °C,            T<sub>in</sub>: Initial material temperature, °C,            T<sub>amb</sub>: Ambient air temperature, °C,            SS: Scanning speed, mm/s,            λ: Thermal conductivity steel, <math>W.m^{-1}.K^{-1}</math>,            σ: Stefan-Boltzmann constant, <math>W.m^{-2}.K^{-4}</math>,            x<sub>0</sub>: Radius of the laser spot, m,            y<sub>0</sub>: Radius of the laser spot, m,            γ: Thermal diffusivity, <math>m^2.s^{-1}</math>,            ε: Emissivity of material surface,            ρ: Density, <math>kg.m^{-3}</math>,</p>
---	--

## 2.2.8 References

- [1] Ion, I. and John, C. (2005) Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann. xviii, 556 p.
- [2] Bojinović, M., Mole, N., and Štok, B. (2015) A computer simulation study of the effects of temperature change rate on austenite kinetics in laser hardening. *Surface & Coatings Technology*. **273**, 60-76. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.075>
- [3] Farrahi, G.H., and Sistaninia, M. (2009) Thermal Analysis of Laser Hardening for Different Moving Patterns. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics* **22**, 169 - 180. <http://inis.iaea.org/search/search.aspx?origq=RN:40101143>
- [4] Martínez, S., Lesyk, D., Lamikiz, A., Ukar, E., and Dzhemelinsky, V. (2016) Hardness Simulation of Over-tempered Area during Laser Hardening Treatment. *Physics Procedia*, **83**, 1357-1366. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.143>
- [5] Sistaninia, M. (2009) Laser Heat Treatment of Metals using Rotating and Dithering Beams. *Recent Advances in Technologies*, IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/7396>
- [6] Tan, T., and Zhou, H. (2013) Numerical Solution for a Transient Temperature distribution on a Finite Domain Due to a Dithering or Rotating Laser Beam.



- International Journal of Operations Research and Information Systems. **4**, 22 - 38. <http://dx.doi.org/10.4018/ijoris.2013100102>
- [7] Zhou, H. (2011) Temperature Rise induced by a Rotating or Dithering Laser Beam. *Adv. Studies Theor. Phys.*, **5**, 443 - 468.
- [8] Guillaume, B., and El Ouafi, A. (2016) Simulation et validation expérimentale du traitement thermique superficiel au laser appliqué à des géométries complexes. ProQuest Dissertations Publishing. <http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1162>
- [9] Caron-Guillemette, G. (2013) Modélisation du procédé de trempe au laser appliqué à des composantes mécaniques complexes. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, <http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/989>
- [10] Komanduri, R., and Hou, Z. B. (2004) Thermal Analysis of Laser Surface Transformation Hardening \_ Optimization of Process Parameters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**, 991-1008. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2004.01.011>
- [11] Shercliff, H., and Ashby, M. (1991) The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening. *Metallurgical Transactions A*, **22**, 2459-2466. <https://doi.org/10.1007/BF02665012>
- [12] Ashby, M., and Easterling, K. E. (1984) The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams—I. Hypo-eutectoid Steels. *Acta Metallurgica*, **32**, 1935-1948. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90175-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90175-5)
- [13] Komanduri, R., and Hou, Z. B. (2001) Thermal Analysis of the Laser Surface Transformation Hardening Process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**, 2845-2862. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00316-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00316-1)
- [14] Steen, W., Watkins, K.G., and Mazumber, J. (2010) *Laser Material Processing*. 4th ed. London: Springer. xvii, 558 p.
- [15] Hung, T. P., Shi, H. E., and Kuang, J. H. (2018). Temperature Modeling of AISI 1045 Steel during Surface Hardening Processes. *Materials (Basel, Switzerland)*, **11**, 1815. <https://doi.org/10.3390/ma11101815>
- [16] Kruse, D., Prekel, H., Goch, G., and Walther, H. G. (2007) Correlation between hardening depth and thermal parameters based on photothermal measurements. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Engineering*. **13**, 423-435. [http://www.kirj.ee/public/Engineering/2007/issue\\_4/eng-2007-4-14.pdf](http://www.kirj.ee/public/Engineering/2007/issue_4/eng-2007-4-14.pdf)
- [17] Tarchoun, B., El Ouafi, A., and Chebak, A. (2020) Experimental investigation of laser surface hardening of AISI 4340 steel using different laser scanning patterns, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, **8**, 9-26. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.82002>



## **CHAPITRE 3**

### **UNE APPROCHE D'OPTIMISATION PRÉDICTIVE DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT SUPERFICIEL PAR LASER AVEC DIFFÉRENTS MODÈLES DE BALAYAGE**

#### **3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE**

La modélisation prédictive et l'optimisation de la qualité deviennent des exigences décisives pour une amélioration continue de la fiabilité, la rentabilité, l'efficacité et la sécurité du traitement de surface par laser. Une stratégie de modélisation précise et efficace représente alors une partie essentielle du processus d'amélioration.

Cet article présente une approche structurée développée pour élaborer une stratégie d'optimisation prédictive efficace basée sur la technique des réseaux de neurones artificiels en utilisant des modèles du procédé directs et inverses pour synthétiser les paramètres optimaux du procédé de traitement de surface par laser de l'AISI 4340 en utilisant différents patrons de balayage. L'approche proposée est basée sur une combinaison de données fournies par des investigations expérimentales structurées en utilisant la méthode Taguchi et des simulations 3D approfondies basées sur la méthode des éléments finis (FEM) pour développer les modèles requis. L'expérimentation est réalisée par un système laser Nd:Yag de 3 kW. Diverses procédures d'apprentissage et de validation sont combinées pour améliorer l'approche de modélisation, et différents outils statistiques sont utilisés pour évaluer la précision et les capacités de généralisation des modèles développés.

Les résultats obtenus montrent que la stratégie d'optimisation proposée présente d'excellentes performances et permet d'identifier efficacement les paramètres optimaux du procédé dans le cas de durcissement de surface par laser avec un maximum d'erreurs relatives inférieur à 5 %. La procédure de validation a révélé que la puissance du laser peut être prédite avec une précision de 98 % alors que la précision de prédiction de la vitesse de balayage est d'environ 97 %. Ces résultats démontrent aussi que la stratégie d'optimisation proposée, basée sur des modèles inverses du procédé, peut effectivement conduire à des résultats cohérents.

Ce troisième article, intitulé « An investigation of predictive optimisation approach using ANN based inverse process model for laser surface hardening of AISI

4340 using different scanning patterns », a été élaboré par moi-même, le professeur Abderrazak El Ouafi et le professeur Chebak Ahmed. Ma contribution en tant que premier auteur a consisté principalement à la recherche bibliographique, la préparation de la base de données, l'élaboration des modèles numériques, l'exécution des tests, l'analyse des résultats et la rédaction de l'article. Le contenu de cet article a été inspiré par le professeur Abderrazak El Ouafi, qui a collaboré également avec le professeur Chebak Ahmed, au développement de la méthode, l'analyse des résultats, la rédaction et la révision de l'article afin qu'il soit prêt à la publication dans les revues scientifiques.

### **3.2 AN INVESTIGATION OF PREDICTIVE OPTIMISATION APPROACH USING ANN BASED INVERSE PROCESS MODEL FOR LASER SURFACE HARDENING OF AISI 4340 USING DIFFERENT SCANNING PATTERNS**

#### **3.2.1 Abstract**

Predictive modelling and quality optimisation become decisive requirements for a continuous improvement of reliability, profitability, efficiency and safety of laser surface hardening. Accurate and effective modelling strategy is an essential part of the improvement process. This paper presents a structured approach developed to design effective artificial neural networks based predictive optimisation strategy using direct and inverse process models to synthesize the optimal process parameters for laser surface hardening of AISI 4340 using different scanning patterns. The proposed approach is based on a fused data provided by structured experimental investigations using Taguchi method and in-depth FEM based 3D simulations to develop the required models. The experimentation are performed on a 3 kW Nd:Yag laser system. Various training and validation procedures are combined to improved statistical tools in order to improve the modelling approach to assess the accuracy and the generalisation capabilities of the developed models. The achieved results demonstrates that the proposed optimisation strategy present excellent performances and can effectively identify the optimal process parameters for laser surface hardening with a maximum relative errors less than 5 %. The validation process reveal that the laser power can be predicted with an accuracy of 98 % while the prediction accuracy of scanning speed is about 97%. These results demonstrate that the proposed inverse process model based optimisation strategy can effectively lead to consistent results.

**Keywords:** Laser surface hardening, Laser scanning patterns, AISI 4340 steel, Predictive Modeling, Hardness profile optimisation, Design of experiments, ANOVA, FEM, Artificial Neural Network.

### 3.2.2 Introduction

Due to its many advantages, laser technology is increasingly used in various industrial processes, such as welding, hardening, etching, cutting, etc. Laser surface transformation hardening is one of the most popular heat treatment process for improving mechanical parts performance. Laser technology is characterized by its ability to apply concentrated, short and localized thermal inputs to ensure increasing wear and fatigue resistance. Compared to other surface heat treatment techniques, laser surface hardening offers significant advantages such as treating specific areas of a part, applied for parts with various sizes and shapes, minimising the deformations and the residual stress in the heat-treated parts, no need for significant reconditioning of the heat-treated surfaces. [1-3]. With laser surface transformation hardening, the major difficulty is to predict the hardness profile with an appropriate accuracy without long and costly test-error techniques. This is even more true when using different laser beam scanning patterns. In addition to the basic parameters, such as laser power, scanning speed and focal spot diameter, that should be set correctly, the hardness profile is greatly affected by the geometrical parameters of the used scanning pattern [4, 5]. Moreover, the non-linear behaviour of the material thermo-physical, thermo-chemical and metallurgical properties affects considerably the hardened surface characteristics [4]. The non-linearity of these phenomena makes the heat flow equation solving more complicated, and the temperature distribution and hardness profile prediction becomes a tedious task [6].

Several prediction models are developed to solve similar problems, but very few are dedicated to predict or optimise laser surface hardening process using different scanning patterns. Some researchers such as Farrahi and Sistaninia [7, 8] addressed this subject, and developed some analytical models that essentially allow the estimation of the temperature distribution profile. This model leads to a better understanding of the material behaviour when using this type of process. Their models proved that the temperature distribution does not just depend on pattern type, but also on geometrical parameters such as amplitude and period. The study reveal also that sinusoidal pattern provides best

temperature distributions compared to trochoid patterns [5, 7-9]. However, this kind of analytical modelling is a slow, delicate and does not allow a realistic evaluation of the effects of the main parameters involved in the process. Hence, it is necessary to look for other modelling alternatives. Bojinović *et al.* [10] and Hung *et al.* [11] have modeled and analyzed the laser hardening process by a high-power diode laser using 3D numerical simulation models. Based on heat flow equation solving, physico-chemical properties using finite element method, these models take into consideration the multi-physical, metallurgical and geometric aspect of the laser surface hardening problem. Jerniti *et al.* [12] developed empirical models based on multiple linear regression to predict the hardness profile and optimize laser hardening process parameters for a single track. The parameters effects and their interactions on the hardened surface characteristics are evaluated experimentally and analysed [12].

Furthermore, artificial neural network (ANN) modeling technique offers more flexibility and speed compared to the finite element modeling method. Researchers such as Lambiase *et al.* [13] and Razavi *et al.* [14] have used this technique to predict the hardness profile obtained by the single-track laser hardening process, and to estimate the best parameters leading to the process optimization. Others such as Billaud *et al.* [6] and Jerniti *et al.* [12] modelled the laser hardening process applied to AISI 4340 steel plates by ANN to directly control the parameters that affect the hardened surface. Hadhri *et al.* [15] and Maamri *et al.* [17] used the same method to heat-treat complex geometries [6,12,15-17]. Several other researchers have exploited the flexibility of ANN by developing inverse models for process optimisation. This technique is widely used in control of non-linear systems avoiding the necessity of performing several simulations before identifying the desired variables. This approach minimize simulation time and efforts. Hussain *et al.* [18, 19] applied this technique to control an exothermic reactor and also analyzed the discrete time stability of the inverse ANN control strategy for a relative second order non-linear system. The results proved that this technique is able to predict variables, which is normally difficult to obtain analytically for non-linear systems. Rajesh *et al.* [20], and Wolpert and Kawato [21] developed inverse models respectively to control motors and optimize the performance of a conical tank system. In both cases, the results showed that this method is capable of accurately solving the problems of non-linear processes. As the ability of analytical models to provide all the information necessary for

the hardness profile prediction remains limited, the importance of taking advantage of the benefits offered by ANN in order to solve the problem laser surface hardening optimisation must be considered.

This paper presents a structured approach developed to design effective artificial neural networks based predictive model and inverse process model to synthesize the optimal process parameters for laser surface hardening of AISI 4340 using different scanning patterns. The modelling approach is based on a series experimental data provided using a 3KW Nd-YAG laser source and simulation data provided by a 3D finite element model to train and test the direct and the inverse ANN based models. Experimentation and simulation are performed using structured experimental designs inspired from Taguchi. The used process parameters are laser power ( $P$ ) and scanning speed ( $SS$ ) with nine levels each to evaluate two hardened surface characteristics: hardened depth ( $HD$ ) and hardened width ( $HW$ ), applied to four different scanning patterns: linear, sinusoidal, triangular and trochoid. For each pattern, 9 experimentations and 81 simulations are achieved. The training and validation of the ANN based model are executed according to three specific procedures and evaluated using various statistical criteria. ANN based models combined with appropriate learning and testing procedures can be considered as efficient option for predicting and optimizing the laser surface hardening process even if using various scanning patterns.

### **3.2.3 Numerical modeling**

#### **3.2.3.1 Model formulation**

This study consists in developing models based on the artificial neural network, allowing at first the prediction of the hardness profile obtained by each displacement pattern during the treatment of AISI 4340 steel, and then the optimization of the process by determining directly the optimal parameters according to the desired properties. Before starting the predictive study, it is essential to have a reliable and usable database allowing the development of predictive models. Therefore, the numerical simulation model developed in the COMSOL Multiphysics software is the ideal solution to generate many parameter combinations and retrieve enough results to develop the ANN models [22].

Using the finite element method, the numerical model includes equations of linear and non-linear heat flow, heat source, density and intensity of the laser used, metallurgical

transformations and boundary conditions in the resolution. Table 18 represents the parametric displacement equations of each trajectory used as well as the correction coefficient equations "b" which is obtained by multiple linear regression. " $X_0$ " and " $Y_0$ " presents the coordinates of the processing starting point, " $x_0$ " and " $y_0$ " are the radius of the focal spot used, " $l$ " and " $L$ " are respectively the width and the length of the mechanical part, " $amp$ " represents the amplitude, " $d$ " represents the distance between the circle centre and any point of the trochoid pattern, " $t$ " represents the time, and " $fr$ " represents the frequency.

Table 18: The parametric equations of different scanning patterns

Patterns	Parametric equations
Linear	$X_{00}=X_0+(SS\times t)$
	$Y_{00}=Y_0$
	$b=1.1892+0.01162.SS-0.000672.P$
Triangular	$X_{00}=X_0+(SS\times t)$
	$Y_{00}=Y_0+\left(\text{amp}\times\frac{2}{\pi}\right)\times\text{asin}\left(\cos\left(\frac{(t\times 5\times\pi\times fr)}{60}\right)\right)$
	$b=1.894+0.02004.SS-0.001672.P$
Sinusoidal	$X_{00}=X_0+(SS\times t)$
	$Y_{00}=Y_0+\text{amp}\times\sin\left(\frac{t\times 5\times\pi\times fr}{60}\right)$
	$b=2.035+0.03672.SS-0.002253.P$
Trochoid	$X_{00}=X_0+(d\times t\times 35)+(SS\times\sin(t\times 35))$
	$Y_{00}=Y_0+(\text{amp}\times\cos(t\times 35))$
	$b=2.501+0.0394.SS-0.002749.P$

The phenomenon of the heat transfer in the material is described by Equation (17), where  $C_p$ ,  $\lambda$  and  $\rho$  are respectively the specific heat, the thermal conductivity and the density of the material.

$$\rho\times C_p\times\frac{\partial T}{\partial t}-\nabla(\lambda\times\nabla T)=Q_{in}(x,y,z,t) \quad (17)$$

The heat source used in the different tests is the same and is described by equation (18), representing a distribution of a Gaussian beam, where « $Rc$ » and « $Ac$ » are respectively the reflection coefficient and the absorption coefficient which change as a function of temperature and which depend essentially on the material used.



$$Q_{in} = P \times (1 - Rc) \times Ac \times b \times \left( \frac{1}{2 \times \pi \times x_0 \times y_0} \right) \times \text{an1}(X, X_{00}, x_0, Y, Y_{00}, y_0) \times \exp(-Ac \times \text{abs}(Ls - Z)) \quad (18)$$

### 3.2.3.2 Numerical simulation conditions

The models developed by the finite element method allows, at first, to understand the behaviour of materials and their characteristics in front of this type of heat treatment, secondly, to generate more simulation, so more data can be recovered with less effort and time compared to the experimental method. Setting initial conditions to solve this kind of problem can greatly simplify model development and reduce calculation time. The material is considered homogeneous and isotropic, its properties are determined at the thermodynamic equilibrium, the ambient temperature is about 20°C, and the maximum temperature must not exceed 1400°C in order to avoid melting and undesirable deformation [22]. Table 19 illustrates the fixed parameters of the treatment process, with "Tstep" is the step of discretization and "Tend" is the end time of the treatment operation.

Taguchi orthogonal designs of experiments have proven their effectiveness in several fields, for this reason, their use is essential in this study, which allows the analysis of the main parameters at nine levels. The considered parameters and their levels are illustrated in Table 20.

Table 19: Simulation parameters of the four scanning patterns

Parameters	Patterns			
	Linear	Sinusoidal	Triangular	Trochoid
$XO$ [mm]	0	0	0	0
$YO$ [mm]	1/2	1/2	1/2	1/2
$x_0$ [mm]	0.255	0.255	0.255	0.255
$y_0$ [mm]	0.255	0.255	0.255	0.255
$Tstep$ [s]	Tend/100	Tend/100	Tend/100	Tend/100
$Tend$ [s]	L/SS	L/SS	L/SS	L/SS
$Amp$ [mm]	1	1	1	1
$d$ [mm]	-	-	-	0.6
$Fr$ [Hz]	-	250	250	-

The levels of the factors studied are chosen in order to ensure that surface transformation occurs and the surface temperature does not reach the melting temperature of AISI 4340 steel, regardless of the combination of treatment parameters. The displacement patterns treated are linear, sinusoidal, triangular and trochoid, and for each

pattern, an L81 is developed to carefully analyze the process parameters and their interactions.

Table 20: Selected parameters and their levels for simulation

Factor	Level								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>P</i> (W)	500	537.5	575	612.5	650	687.5	725	762.5	800
<i>SS</i> (mm.s <sup>-1</sup> )	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40

### 3.2.4 Numerical model validation

#### 3.2.4.1 Experimentation

Even if the experimentation is a costly and tedious solution to analyse any studied problem or phenomenon, it remains essential in order to validate reliable and efficient numerical models that enable the production of more variants and collect more results. Generally, experimental trials should form the basis of any study even with the minimum number of tests performed. For this purpose, four L9s (one L9 for each pattern) are performed on AISI 4340 steel plates quenched and tempered to 25-30 HRC using an ND:YAG laser source powered by a YLS-3000-ST2 IPG laser fiber and mounted on a FANUC M-710IC robot allowing freedom to move in all directions. This laser source belongs to class 4 and is characterized by a maximum power of 3 KW, an invisible laser beam, a wavelength of 1070 nm and a focal length of 310 mm. The diameter of the focal spot used is 0.52 mm and can be adjusted by means of a collimator assembled in the laser head [23]. Figure 41 shows the laser source used with more detail.

Experimental validation of numerical simulation models requires a careful selection of tests to be performed in order to represent the full set of data obtained from the simulations and to reduce experimental costs and effort. Table 21 illustrates the different parameters studied and their ranges of variation. Depending on the factors studied and their variation ranges, a structured experimental design for the validation phase is adopted. Four L<sub>9</sub> matrix, one for each moving pattern, is used to validate the numerical model.

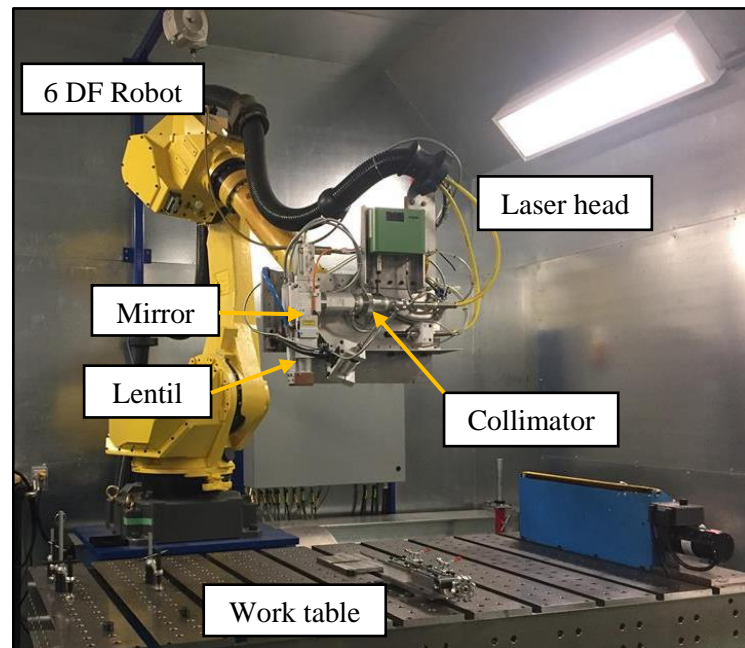


Figure 41: Experimental setup of steel plate's laser surface hardening using laser cell

Table 21: Selected parameters and their levels for experimentation

Parameters	Variation ranges
$P$ (W)	500 - 650 - 800
$SS$ (mm/s)	20 - 30 - 40
Patterns	Linear - Sinusoidal - Triangular - trochoid

To evaluate the hardened depth and the hardened width, the heat-treated specimens must pass through a series of standard metallographic analysis procedure. This consist initially of sampling the specimens by cutting, then coating and polishing the obtained samples, then performing a chemical etching with Nital chemical solution (95% ethanol and 5% nitric acid) to determine the limits of the hardness profiles and finally, measuring  $HD$  and  $HW$  by the CLEMEX precision microscope [23].

A comparison between the numerical simulation and experimental results of  $HD$  and  $HW$  is illustrated in Table 22. This table shows that the proposed numerical models can accurately estimate  $HD$  and  $HW$  with maximum relative errors not exceeding 9.1% [23].

### 3.2.4.2 Model evaluation

The 3D simulation results are enough accurate since the model is calibrated and validated by experimental tests. The four L81 generated by the numerical simulation

model are treated using ANOVA. This operation essentially made it possible to evaluate the parameters effects and contributions in hardness profiles variation for each scanning pattern.

Table 22: Experimental validation results

Predicted Characteristics ( $\mu\text{m}$ )	Relative Errors (%)	Scanning patterns			
		Linear	Sinusoidal	Triangular	Trochoid
<b>Hardened depth: <math>HD</math></b>	Minimum	0.60%	2.90%	0.90%	1.00%
	Maximum	6.30%	9.10%	7.10%	3.70%
	Average	2.83%	6.43%	4.76%	2.28%
<b>Hardened width: <math>HW</math></b>	Minimum	0.70%	2.30%	1.00%	0.80%
	Maximum	9.10%	4.70%	4.00%	2.70%
	Average	4.52%	3.67%	2.68%	1.81%

Figure 42 illustrate the temperature distribution for the sinusoidal moving pattern achieved using a  $P$  of 800 W and a  $SS$  of 20 mm/s, where it is clear that the temperature decreases by moving away from the focal spot. The contribution of the parameters as well as the values of  $F$  for the different scanning patterns are grouped in Table 23. It is observed that the contribution of  $P$  is slightly higher than  $SS$  in the case of  $HD$ , while, in the case of  $HW$ ,  $SS$  contribution is much higher than  $P$ , for the triangular and trochoid pattern. However, for the linear pattern,  $P$  has the highest contribution in both cases  $HD$  and  $HW$ , contrary to the sinusoidal pattern where the  $SS$  has the highest contribution.

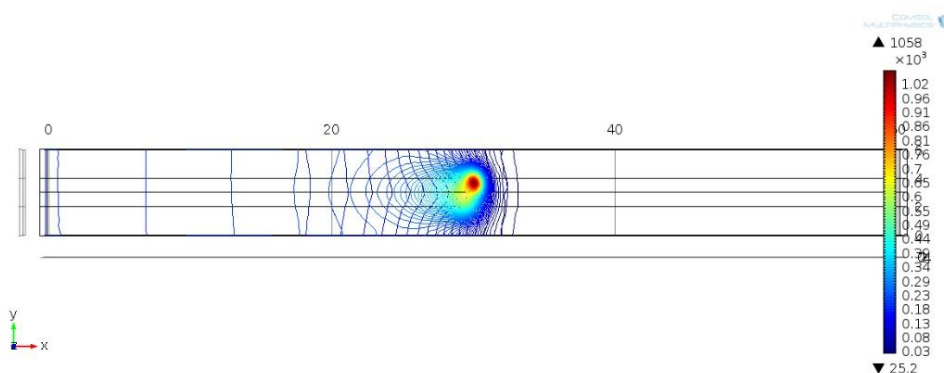


Figure 42: Typical temperature distribution during simulations - Case of sinusoidal pattern at 800 W for P and 20 mm/s for SS

For example, for the sinusoidal pattern, the contribution of  $P$  is 46% versus 49% for  $SS$  in the case of  $HD$ . On the other hand, for  $HW$ , the contribution of  $P$  is 28% versus 68% for  $SS$ . For the triangular pattern, different statistics are observed. For  $HD$ ,  $P$

contributes 61% versus 32% for *SS*, while, for *HW*, *P* contributes 29% versus 68% for *SS*, similarly for the trochoid and linear pattern.

Table 23: ANOVA analysis for the hardened depth and hardened width for the four scanning patterns

Pattern type	Source	<i>HD</i>		<i>HW</i>	
		Contribution (%)	F-value	Contribution (%)	F-value
linear	<i>P</i>	70.00	99.14	55.98	158.12
	<i>SS</i>	28.27	57.75	40.75	0.83
	<i>P*SS</i>	0.10	4.95	0.61	17.63
	Error	1.62	-	2.66	-
Sinusoidal	<i>P</i>	46.70	72.69	28.50	4.52
	<i>SS</i>	49.48	8.04	68.35	459.87
	<i>P*SS</i>	0.18	3.82	2.00	134.30
	Error	3.64	-	1.15	-
Triangular	<i>P</i>	61.82	137.04	29.05	85.76
	<i>SS</i>	32.62	1.38	68.46	19.45
	<i>P*SS</i>	1.28	23.01	0.22	7.39
	Error	4.28	-	2.27	-
Trochoid	<i>P</i>	61.32	3.46	21.94	1592.88
	<i>SS</i>	27.85	24.54	76.99	5589.75
	<i>P*SS</i>	1.01	7.90	-	-
	Error	9.84	-	1.07	-

Several other criteria are adopted in order to evaluate rigorously the numerical model before using the generated simulation data in any predictive modelling. Hence, the selected evaluation criteria are: Coefficient of determination ( $R^2$ ), Maximum Relative Error (MxRE), Mean Root Squared Error (MRSE), Relative Mean Root Squared Error (RMRSE), Mean Absolut Error (MAE) and Mean Absolut Percent Error (MAPE). These criteria are expressed as follows:

$$R^2 = \left( \frac{n(\sum_{i=1}^n x_i y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \right)^2 \quad (19)$$

$$MxRE = \max \left( \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100 \right) \quad (20)$$

$$MRSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (21)$$

$$\text{RMRSE} = \frac{\text{MRSE}}{\bar{y}} = \frac{\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\bar{y}} \quad (22)$$

$$\text{MAE} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \right) \quad (23)$$

$$\text{MAPE} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (24)$$

The MRSE provides a synthetic measure of the overall error in a single value. The MAPE also helps to describe the accuracy and concordance of measurements by presenting the mean of the deviations in absolute value versus the observed values. Table 24 presents the main errors found between the simulation data and the predictive results obtained from the statistic study. In the case of hardened depth, the maximum relative error is observed in the sinusoidal pattern with a value of 8.12%, while in the case of hardened width, the maximum relative error is observed at the linear pattern level with a value of 3.4%. The average relative error for *HD* is 2.5%, as well as for *HW* is 0.57%, which confirms the validity and accuracy of the developed models.

Table 24: Comparison of main errors observed between simulated and predicted HD and HW for the four moving patterns

Pattern	MxRE (%)		MRSE ( $\mu\text{m}$ )		MAPE (%)	
	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>
<b>Linear</b>	9.25	5.93	2.30	1.89	2.57	1.56
<b>Sinusoidal</b>	9.36	1.88	1.44	1.42	4.37	0.38
<b>Triangular</b>	9.91	1.13	1.80	1.04	4.09	0.32
<b>Trochoid</b>	7.40	0.79	2.44	0.81	3.04	0.24

### 3.2.5 ANN based predictive modelling

#### 3.2.5.1 Modelling procedure

Artificial neural networks (ANN) have become increasingly used in all fields, because of their great predictive capability and accuracy [24]. Moreover, this technique offers predictive models more efficient than many other techniques, especially in the case of non-linear relationships in multi-inputs and multi-outputs systems. ANN modeling can also be used to solve problems where there is a lack of information or knowledge about the nature of relationships and interactions between the modelling variables [24]. The feed-forward ANN is selected for this application.

For direct prediction models, laser power and scanning speed are used as inputs and  $HD$  and  $HW$  are the outputs. Since we have only two inputs and two outputs, a single hidden layer is enough to get good results. After several tests and comparing the relative error, RMSE and MAPE of the results obtained for each test, the number of neurons of the hidden layer is fixed at nine neurons for minimum errors and rapid training. The activation function used is the non-linear function for both hidden and output layers. Figure 43 shows the architecture of the ANN used in this study.

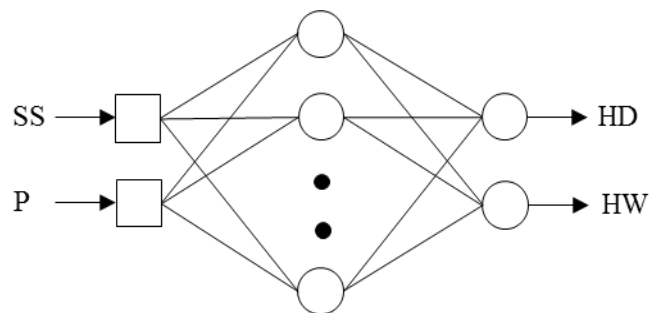


Figure 43: ANN direct model architecture

To increase the models capabilities, each L81 is randomized and divided into three classes with the same size (27 data per class). Four validation procedures are used ensuring that all data are used for all calculation phases:  $P_0$  - the three classes are used for training and the nine (L9) experimental tests for validation.  $P_1$  - the first class is used for validation and the two other classes for training and the experimental tests for a second validation.  $P_2$  - the second class is used for validation, the two other classes for training and the experimental tests for a second validation.  $P_3$  - the third class is used for validation, the two other classes for training and the experimental tests for a second validation.

This method makes it possible to obtain for each data group their predicted results, which are then analyzed and compared according to several evaluation criteria. For each validation, at least three simulations are performed and the final results are obtained by averaging the outputs. The reason of training the models several times is to avoid the effect of randomly chosen the weight coefficients in the different phases.

### 3.2.5.2 Model evaluation

At first sight, it should be noted that ANN models do not require a lot of computation time, which makes them efficient and advantageous compared to 3D

simulation models. The data collected are used for both training and validation using a well-structured method, and the results obtained from the errors and the determination coefficient ( $R^2$ ) are satisfactory. Table 25 shows the values of the various assessment criteria of the different patterns studied during model development. Regardless of the type of pattern or evaluation criteria, it is noted that the three procedure  $P1$ ,  $P2$  and  $P3$  does not have a significant effect on the results. This is why the maximum of the errors obtained by these procedures are considered. Comparing this maximum to  $P0$ , the procedure  $P0$  presents a minimum of errors in all phases thanks to the important number of data introduced in the training step.

The magnitude of errors increases considerably from the training step to the validation step then to the experimental validation step, regardless of the used procedure or the type of pattern and contrary to the determination coefficient, which decreases gradually. For example, the relative  $HD$  error of the  $P1$  procedure of the triangular pattern increases from 5.81% in the training phase to 7.83% in the numerical data validation phase, to 8.17% in the experimental validation phase. This variation is probably due to the used data. The ANN model presents a good accuracy with a maximum relative error of 9.7% observed for  $HD$  of the sinusoidal pattern and 9.5% for  $HW$  of the linear pattern. The most significant global  $R^2$  is observed in the sinusoidal pattern for  $HD$  and  $HW$  of about 99.5%. Furthermore, regardless of the type of pattern or the type of procedure, the  $HW$  errors are lower than the  $HD$  errors. This difference is probably due to the magnitude of the variations between the data obtained by the different combinations of parameters.

For the hardened depth, a maximum of MAPE of about 5.8% is observed in the  $P0$  procedure at the experimental validation step for the sinusoidal pattern, while for  $HW$ , the maximum of MAPE about 4.8% is found also in the experimental validation step in the  $P3$  procedure for the linear pattern. The most important RMRSE value of about 2.25% is observed in the triangular pattern for  $HD$ , but for  $HW$  the maximum is 1.8% in the linear pattern. The prediction model developed for the trochoid pattern gives the lowest MAE, MAPE, MxRE and RMRSE values, but also the lowest  $R^2$  values, what it means to have relatively a low correlation between simulated and predicted data.

Figures 44 to 47 represent a comparison between the simulated data and those predicted by the ANN model, indicating also  $R^2$ . The eight figures show that the model is



well trained and the offered values are close enough to those obtained by numerical simulations, which makes it capable of accurately predicting new hardened depths and widths according to a given parameter combinations chosen by the user. The coefficient of determination is too close to 1 in the different cases and for both *HD* and *HW*, and the majority of data is on the bisector, which mean that the models are greatly accurate.

Table 25: Comparison of ANN errors observed between real and predicted *HD* and *HW* for the four moving patterns

		<b>MAE (%)</b>		<b>MAPE (%)</b>		<b>MRSE</b>		<b>MxRE (%)</b>		<b>RMRSE</b>		
P	Step	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	<i>HD</i>	<i>HW</i>	
<b>Linear</b>	P0	Train	7.85	2.36	1.31	0.76	1.18	0.88	6.41	1.93	0.17	0.10
		Exp_V	12.48	8.84	3.31	4.51	8.68	15.25	6.05	7.52	1.25	1.65
	Max	Train	8.71	3.33	1.26	0.89	1.42	1.23	6.39	2.97	0.21	0.14
		Exp_V	14.74	11.91	3.31	4.88	8.96	16.80	7.14	9.51	1.29	1.82
<b>Sinusoidal</b>	P0	Train	11.15	0.77	1.49	0.21	0.54	0.77	5.37	0.68	0.20	0.03
		Exp_V	17.46	5.88	5.82	3.64	5.32	32.50	7.90	5.29	2.05	1.25
	Max	Train	11.37	1.70	1.71	0.33	0.81	1.44	5.12	1.70	0.28	0.06
		Exp_V	25.62	6.11	5.68	3.68	5.32	33.27	9.70	5.50	2.05	1.28
<b>Triangular</b>	P0	Train	13.06	0.64	1.53	0.17	0.66	0.57	5.34	0.59	0.20	0.02
		Exp_V	22.34	4.43	4.68	2.74	6.46	23.22	8.59	4.26	2.01	0.96
	Max	Train	14.73	0.66	1.43	0.16	0.84	0.69	5.81	0.64	0.26	0.03
		Exp_V	29.93	4.54	5.36	2.85	7.24	24.61	8.17	4.36	2.26	1.01
<b>Trochoid</b>	P0	Train	3.13	0.67	0.79	0.20	0.66	0.66	2.28	0.62	0.10	0.03
		Exp_V	5.01	3.05	1.97	1.67	5.00	14.37	3.99	2.68	0.79	0.60
	Max	Train	4.77	0.83	1.01	0.20	1.02	0.79	3.24	0.77	0.16	0.03
		Exp_V	6.63	3.53	2.78	1.73	6.86	15.22	4.86	3.10	1.09	0.64

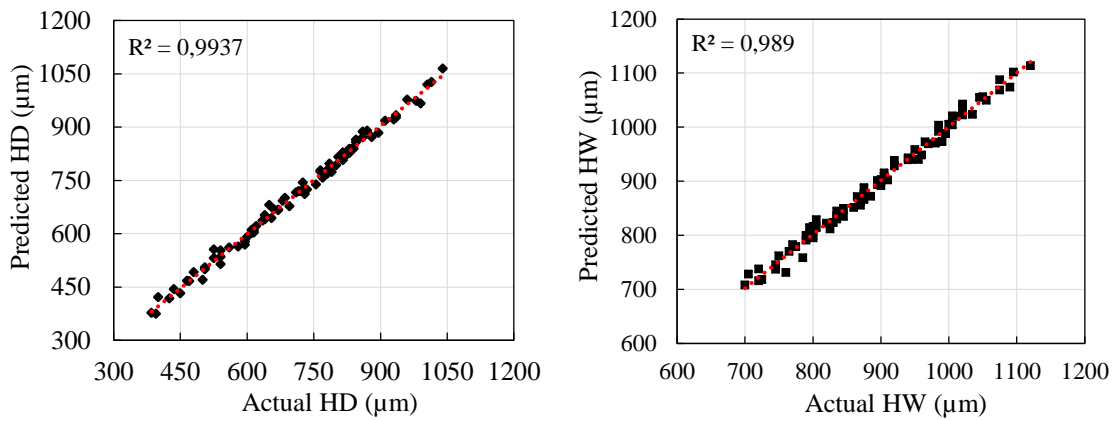


Figure 44: Scatter plot - Real and ANN predicted *HD* and *HW* for linear moving pattern

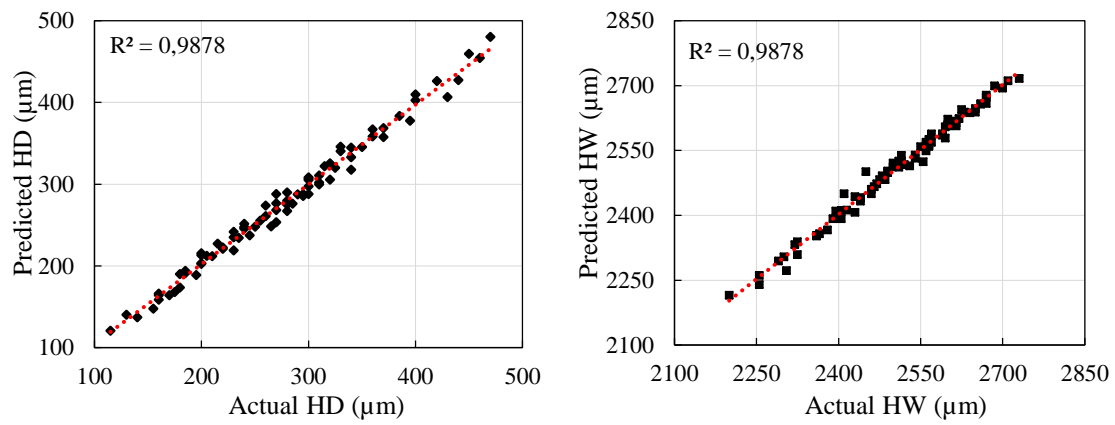


Figure 45: Scatter plot - Real and ANN predicted *HD* and *HW* for sinusoidal moving pattern

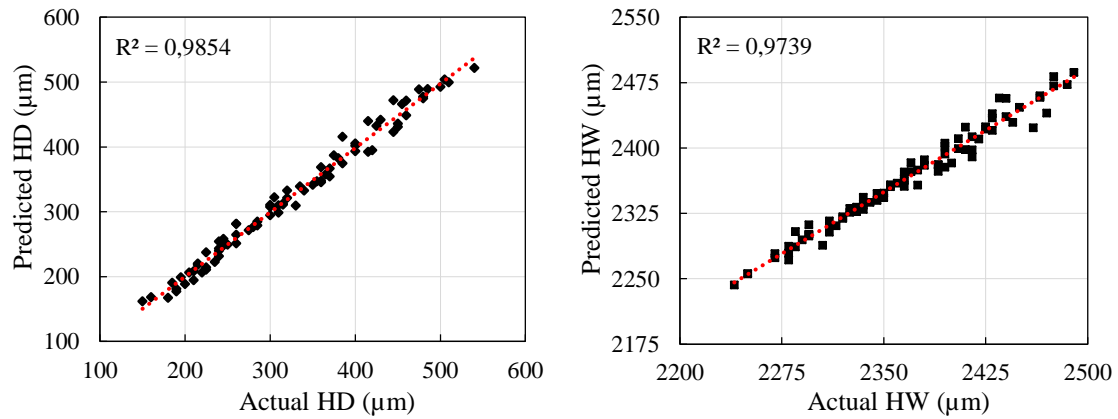


Figure 46: Scatter plot - Real and ANN predicted *HD* and *HW* for triangular moving pattern

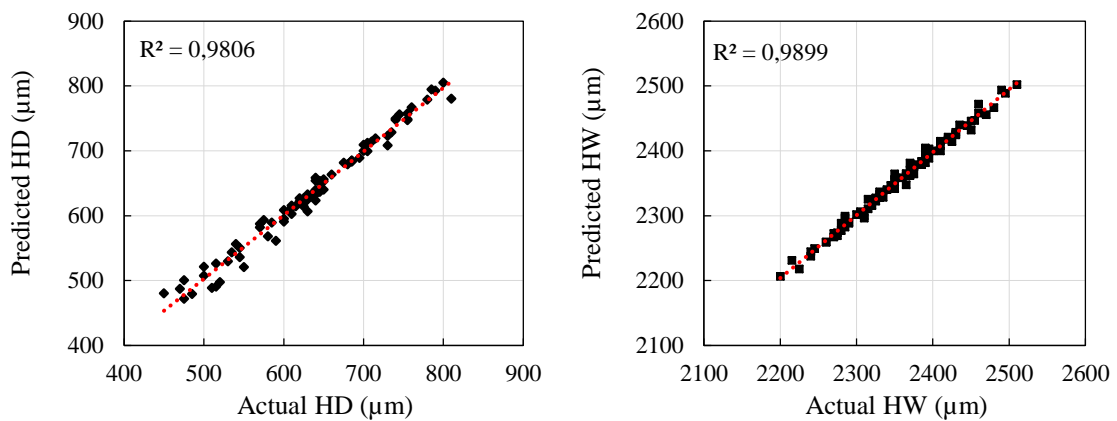


Figure 47: Scatter plot - Real and predicted  $HD$  and  $HW$  for trochoid moving pattern

### 3.2.6 ANN based inverse process model

The ANN prediction models proposed in the previous section is very useful. They save a lot of time and modeling effort and provide accurate and satisfactory predictive results. These models will be very advantageous since they estimate the hardened depths and the hardened widths for specific laser power and scanning speed combination. However, this approach requires several simulations before coming across the right combination allowing the desired  $HD$  and  $HW$  range. Hence, the idea here consists to develop adapted models to find directly the heat treatment recipes according to the desired  $HD/HW$  and to avoid the execution of several simulations to obtain the suitable parameter combinations for specific surface characteristics. Until now, numerical simulation and prediction models certainly have gained a lot of time and effort compared to experimental investigations. However, the needed simulation time remains considerable. It possibly will be reduced using an adapted modelling and optimisation strategy. In this context, the inverse process model based optimisation can be considered as a potential possibility.

The proposed approach is inspired by the nonlinear-based inverse model control strategy. The main advantage of inverse process model lies in its direct use to build a process controller. The inverse process model use the desired process dynamic characteristics as input variables and the actions as output variables. This allows to predict the action to engage in order to produce desired process behavior [25]. Hussain *et al.* [18, 19] have studied firstly the use of these control strategies to control an exothermic reactor, then, the discrete-time stability analysis of a neural network inverse model control strategy for a relative order two nonlinear system. According to their research, this technique is highly dependent on the availability of the inverse of the system model under

control, which are normally difficult to obtain analytically for non-linear systems, and since neural networks have the ability to model many nonlinear systems, including their inverse, their use is very fundamental in their study [18, 19]. Based on multiple pairs of inverse and forward models, Wolpert and Kawato [21] have developed a modular approach to learn and control a motor. Their research has resulted in an architecture capable of simultaneously learning the multiple inverse models required for control as well as selecting the appropriate inverse models for a given environment. Rajesh *et al.* [20] have used a direct inverse control model to obtain an optimized response and performance of a conical tank system. In their research, they trained the model by Levenberg Marquardt Back propagation algorithm and they found that this method realize a good dynamic behaviour of interacting and non-interacting conical tank system [20].

### 3.2.6.1 Modelling procedure

As established previously, an ANN model is able to represent physical and dynamic process behavior using a set of input-output exemplars. In addition, one of the most striking characteristics of ANN is their ability to learn also the inverse of this relationship simply by switching the inputs and the outputs in the exemplar set prior to learning. This provide a model of the inverse process physics and dynamics. This application will focus on the use of inverse process model capabilities as an optimiser of the process parameters. More specifically, the proposed approach will use the inverse process model to optimize *HD* and *HW*, simultaneously.

Inspired by inverse models based control approaches [25-26] and recurrent neural network [26-30], the proposed inverse process model based optimisation strategy is presented in Figure 48. The inverse model provides, basically, the hardening process with the optimal heating conditions input vector *X* that comprises laser power and scanning speed. The process response to those inputs is an output vector *Y* representing the hardened surface characteristics *HD* and *HW*.

$$X = [P, SS] \quad (25)$$

$$Y = [HD, HW] \quad (26)$$

$$Y^* = [HD^*, HW^*] \quad (27)$$

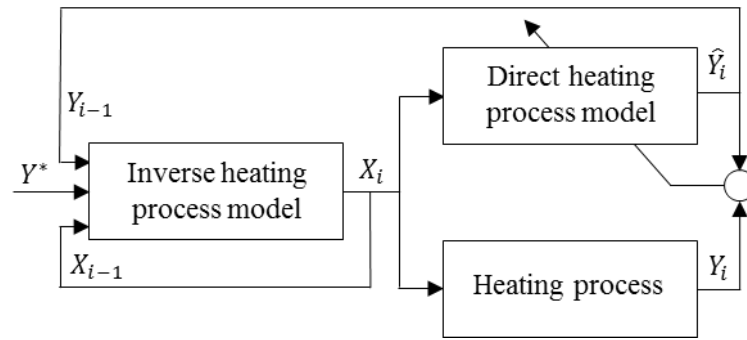


Figure 48: Block diagram of inverse process model based optimization strategy

Based on the nonlinear inverse model optimization strategy more specifically, the inverse process model predicts the optimal process inputs ( $P_i$  and  $SS_i$ ) to be used given the desired hardened surface characteristics  $HD^*$  and  $HW^*$  for the next operation ( $Y_{i+1}^*$ ), the current operation hardened surface characteristics  $Y_i$ , and the last process inputs  $P_{i-1}$  and  $SS_{i-1}$ . The model architecture is presented in Figure 49. Despite the fact that higher order dynamics could be considered in this approach by using  $P$ ,  $SS$  and  $Y$  terms obtained at previous operations ( $i-1$ ,  $i-2$ , ...  $i-n$ ), only a delay of one sampling period will be considered in the present application. Like the inverse process controller, the proposed inverse process model anticipates process behavior both physically and dynamically, and can lead to possible instability.

For computer simulations, the direct process feed-forward ANN model established in the previous section replaces the heating process presented in the block diagram of Figure 48. This ANN model predicts the hardened surface characteristics  $HD$  and  $HW$  as function of  $P$  and  $SS$ . Using the data produced by simulation using variables and levels presented in Table 20, four sets of 81 exemplars of the form  $(Y_{i+1}, Y_i, P_i, SS_i, P_{i-1}, SS_{i-1})$  are obtained. Four other sets of 9 exemplars produced by means of experiments are reserved for the validation of the inverse process models.

Note that the direct process feed-forward ANN model is continuously updated. The last process output  $Y_i$ , is compared to  $\hat{Y}_i$  estimated by the direct process model in response to the actual process input  $X_i$  at operation  $t$ . For this single epoch adaptation, the direct process model is trained not only with the last collected exemplar but also with the 81 ones used for the previous training phase. This procedure is adopted to avoid the deterioration of the initially memorized information. The proposed model adaptation can compensate for the variations of the process conditions such non-homogeneous material

properties and non-homogeneous heat absorption contributing and increase the optimisation efficiency.

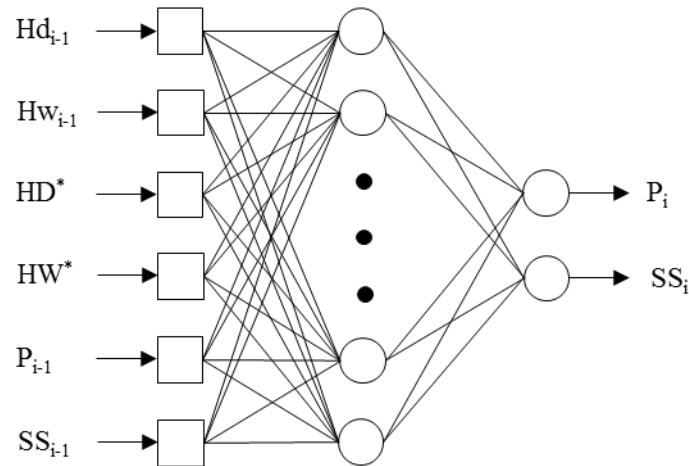


Figure 49: Architecture of the inverse process model

### 3.2.6.2 Model evaluation

The inverse models based on this prediction technique have shown a very good predictive capability with very satisfactory results, including the speed of calculation offered by this method to determine appropriate parameter combinations for the desired hardened depths and widths. Taking the example of the trochoid pattern,  $SS$  has a maximum relative error of 4.64% observed in the validation phase. The maximum relative error for  $P$  is 3.56% observed in the same phase. The minimum determination coefficient ( $R^2$ ) observed in all calculation phases (training, validation and experimental validation) is 99.48%, which proves the high correlation between the real parameters and those predicted by the inverse models. A maximum MAPE of 1.38% is observed during the validation phase for  $SS$ , as long as the maximum MAPE for  $P$  is 0.72%. Table 26 presents the rest of the statistical estimators such as MRSE, RMRSE and MAE, which allow the evaluation of the results obtained and the accuracy of the models developed in the different phases of prediction.

The good correlation between the expected parameters and those predicted by the inverse ANN models is also observed in Figures 50, 51 and 52 where it is clear that most of the data are on the trend line for both parameters and in all steps. Figure 50 represents the real and predicted  $SS$  and  $P$  obtained from the models during the training step, Figure 51 represents the data obtained during the validation phase based on simulated data, and

Figure 52 shows the experimental and the predicted  $SS$  and  $P$  during the experimental validation step. These figures also confirm the accuracy and efficiency of the prediction technique used and the reliability of the inverse models developed.

Table 26: Summary of statistical performance estimators for the trochoid moving pattern

<b>Criteria</b>	<b>Training</b>		<b>Validation</b>		<b>Exper_Val</b>	
	<i>SS</i>	<i>P</i>	<i>SS</i>	<i>P</i>	<i>SS</i>	<i>P</i>
<b>MAE (%)</b>	4.40	2.21	5.22	3.83	1.62	2.22
<b>MAPE (%)</b>	1.09	0.37	1.38	0.72	0.47	1.16
<b>MRSE</b>	0.06	0.48	0.06	0.78	0.06	2.66
<b>MxRE (%)</b>	2.57	1.53	4.64	3.56	0.81	1.71
<b>RMRSE</b>	0.19	0.07	0.21	0.12	0.20	0.41

### 3.2.7 Discussion

According to the assessment of the different models developed, the modelling approach used showed a good predictive capability considering the complexity of the proposed problem. Inverse predictive models have greatly reduced the time and effort spent in determining the appropriate parameter combinations to obtain the desired characteristics. However, to build these models, the use of 3D numerical modelling, experimentation and direct predictive models is inevitable, simply, because there is no reliable database, ready to be exploited, on the laser processing technique using different moving patterns. Since the structure of each moving pattern is different from one to another, it is essential to define the parametric equations that perfectly represent each pattern, and that ensure a fair comparison for this study. After defining the equations, the different variables in each equation had to be fixed, and this is only possible by running several simulation trials in order to keep the same processing time for all the patterns.

For the ANN predictive models, after the elaboration of the script necessary for the execution of the predictive calculation, several tests are essential in order to fix the different variables such as the type of the transfer function, the type of the activation function, the number of layers, the number of neurons of the hidden layer etc. The purpose of using a special data classification procedure is to ensure that the prediction models take into account all the data provided in all the calculation phases, which gives confidence in the proposed modelling approach.

The different tools used to develop the database, have passed through a severe and well-structured evaluation grid. The use of different evaluation criteria is crucial to ensure that the models proposed in each modelling step are accurate and provided correct results. In the various models proposed, validation errors is less than 10%, and the mean precision is approximately at 94%. With a minimum coefficient of determination of 97%, the experimental validation showed a high precision in both numerical simulation and predictive models, regardless the type of pattern studied.

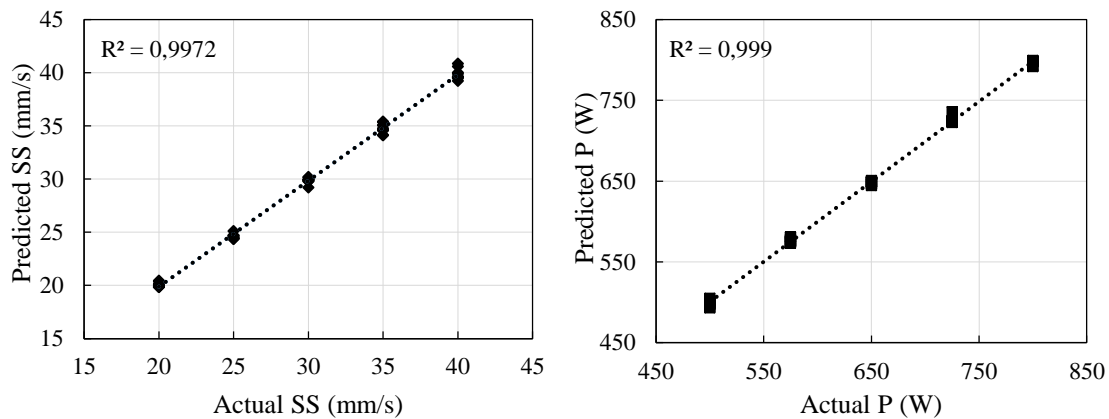


Figure 50: Scatter plot - Actual and predicted SS and P at the training step for the trochoid pattern

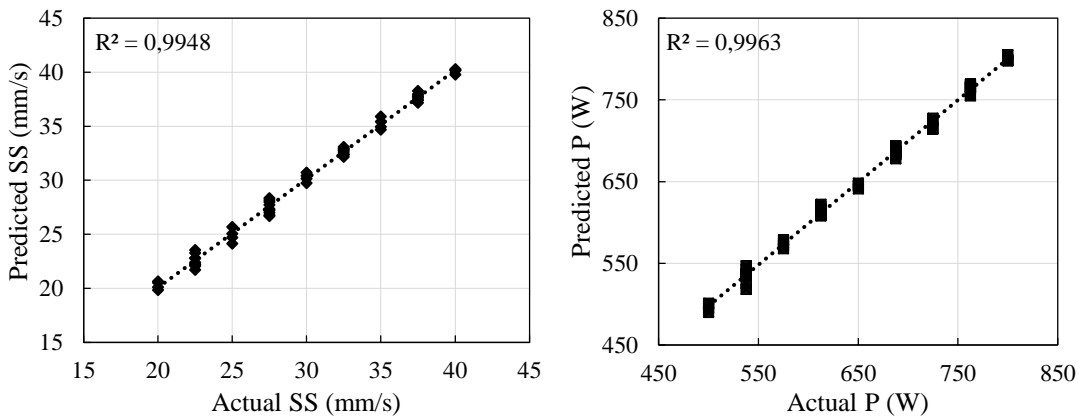


Figure 51: Scatter plot - Actual and predicted SS and P at the validation step for the trochoid pattern



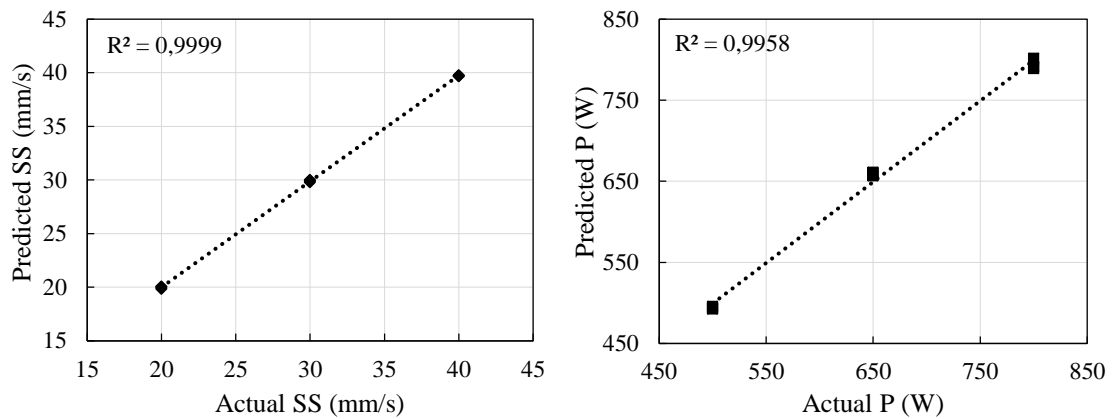


Figure 52: Scatter plot - Actual and predicted SS and P at the experimental validation step for the trochoid pattern

### 3.2.8 Conclusion

This paper presents a structured approach developed to design effective artificial neural networks based predictive optimisation strategy using direct and inverse process models to synthesize the optimal process parameters for laser surface hardening of AISI 4340 using different scanning patterns. Based on a fused data provided by structured experimental investigations using Taguchi method and in-depth finite element method based 3D simulations to develop the predictive model and the inverse process model. The results provided by the numerical models are validated by several experimental tests using a 3 kW Nd:YAG laser source. Feed forward neural networks are extensively used in modeling support. Four training and validation procedures are proposed to improve the modelling process. Various improved statistical tools are used to evaluate the accuracy and the generalisation capabilities of the developed models. The achieved results reveal excellent performances and demonstrates the relevance of the proposed optimisation strategy. The predictive model presents a maximum relative error of 9.7% for the hardened depth and 9.5% for the hardened width. The inverse model can effectively identify the optimal process parameters for laser surface hardening with a maximum relative error less than 5 %. The validation process reveal that the laser power can be predicted with an accuracy of 98 % while the prediction accuracy of scanning speed is about 97%. These results demonstrate that the proposed inverse process model based optimisation strategy can effectively lead to practical and consistent results. The effects of other parameters such as frequency, geometry and focal spot diameter can be the subject of further investigations.

### 3.2.9 References

- [1] Ashby, M.F., and Easterling, K. E. (1984) The transformation hardening of steel surfaces by laser beams—I. Hypo-eutectoid steels. *Acta Metallurgica*. **32**(11), 1935-1948. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90175-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90175-5)
- [2] Selvan, J., Subramanian, K., and Nath, A. K. (1999) Effect of laser surface hardening on En18 (AISI 5135) steel. *Journal of Materials Processing Technology*. **91**(1), 29-36. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00430-0)
- [3] Shercliff, H., and Ashby, M. (1991) The prediction of case depth in laser transformation hardening. *Metallurgical Transactions A*. **22**(10), 2459-2466. <https://doi.org/10.1007/BF02665012>
- [4] Kannatey-Asibu, E. (2009) *Principles of Laser Materials Processing*. Wiley, Hoboken. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470459300>
- [5] Zhou, H. (2011) Temperature Rise induced by a Rotating or Dithering Laser Beam. *Adv. Studies Theor. Phys*. **5**, 443 - 468.
- [6] Billaud, G., El Ouafi, A., and Barka, N. (2015) ANN Based Model for Estimation of Transformation Hardening of AISI 4340 Steel Plate Heat-Treated by Laser. *Materials Sciences and Applications*. **6**, 978-994. <http://10.4236/msa.2015.611098>
- [7] Farrahi, G.H., and Sistaninia, M. (2009) Thermal Analysis of Laser Hardening for Different Moving Patterns. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics* **22**, 169 - 180. [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:40101143](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:40101143)
- [8] Sistaninia, M. (2009) Laser Heat Treatment of Metals using Rotating and Dithering Beams. *Recent Advances in Technologies*, IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/7396>
- [9] Tan, T., and Zhou, H. (2013) Numerical Solution for a Transient Temperature distribution on a Finite Domain Due to a Dithering or Rotating Laser Beam. *International Journal of Operations Research and Information Systems*. **4**, 22 - 38. <http://dx.doi.org/10.4018/ijoris.2013100102>
- [10] Bojinović, M., Mole, N., and Štok, B. (2015) A computer simulation study of the effects of temperature change rate on austenite kinetics in laser hardening. *Surface & Coatings Technology*. **273**(1), 60-76 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.075>
- [11] Hung, T.P., Shi H.E., and Kuang, J.H. (2018) Temperature Modeling of AISI 1045 Steel during Surface Hardening Processes. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma11101815>
- [12] Jerniti, A.G., El Ouafi, A., and Barka, N. (2016) A Predictive Modeling Based on Regression and Artificial Neural Network Analysis of Laser Transformation Hardening for Cylindrical Steel Workpieces. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. **6**, 149-163. <http://dx.doi.org/10.4236/jsemat.2016.64014>

- [13] Lambiase, F., Di Ilio, A. M., and Paoletti, A. (2013) Prediction of Laser Hardening by Means of Neural Network. *Procedia CIRP*. **12**, 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.032>
- [14] Razavi, S. A., Ashrafizadeh, F., and Fooladi, S., (2016) Prediction of age hardening parameters for 17-4PH stainless steel by artificial neural network and genetic algorithm. *Materials Science and Engineering: A*. **675**, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.049>
- [15] Hadhri, M., El Ouafi, A., and Barka, N. (2017) Prediction of the hardness profile of an AISI 4340 steel cylinder heat-treated by laser - 3D and artificial neural networks modelling and experimental validation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. **31**(2), 615-623. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0114-4>
- [16] Jerniti, A.G., El Ouafi, A., and Barka, N. (2016) Single Track Laser Surface Hardening Model for AISI 4340 Steel Using the Finite Element Method. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. **6**, 17-27. <http://dx.doi.org/10.4236/mnsms.2016.62003>
- [17] Maamri, I., Barka, N., and El Ouafi, A. (2018) ANN Laser Hardening Quality Modeling Using Geometrical and Punctual Characterizing Approaches. *Coatings*. **8**(6). <https://doi.org/10.3390/coatings8060226>
- [18] Hussain, M.A., Jarinah, M. A., and Khan, M. J. H. (2014) Neural Network Inverse Model Control Strategy: Discrete-Time Stability Analysis for Relative Order Two Systems. *Abstract and Applied Analysis*, **11**. <https://doi.org/10.1155/2014/645982>
- [19] Hussain, M. A., Kittisupakorn, P., and Daosu, W. (2001) Implementation of neural-network-based inverse-model control strategies on an exothermic reactor. *Science Asia*. **27**, 41-50.
- [20] Rajesh, R.J., Preethi, R., Mehata, P., Pandian, B.J., (2015) Artificial neural network based inverse model control of a nonlinear process. in 2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IC4.2015.7375581>
- [21] Wolpert, D.M. and Kawato, M. (1998) Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*,. **11**(7), 1317-1329. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00066-5)
- [22] Tarchoun, B., El Ouafi, A., and Chebak, A. (2020) Numerical Investigation of Laser Surface Hardening of AISI 4340 using a 3D Thermal Analysis of Different Laser Scanning Patterns. *Open Journal of Modelling and Simulation*.
- [23] Tarchoun, B., El Ouafi, A., and Chebak, A. (2020) Experimental Investigation of Laser Surface Hardening of AISI 4340 steel using Different Laser Scanning Patterns. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, **8**, 9-26. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.82002>
- [24] Haykin, S. (2009) *Neural Networks and Learning Machines Third Edition*. McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.

- [25] Murray-Smith, D. J. (2000). The inverse simulation approach: a focused review of methods and applications. *Mathematics and computers in simulation*, **53**(4-6), 239-247. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00210-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00210-X)
- [26] Kambhampati, C., Craddock, R. J., Tham, M., & Warwick, K. (2000). Inverse model control using recurrent networks. *Mathematics and computers in simulation*, **51**(3-4), 181-199. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(99\)00116-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(99)00116-0)
- [27] Tsoi, A. C., & Back, A. (1997). Discrete time recurrent neural network architectures: A unifying review. *Neurocomputing*, **15**(3-4), 183-223. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(97\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(97)00161-6)
- [28] Jacobsson, H. (2005). Rule extraction from recurrent neural networks: Ataxonomy and review. *Neural Computation*, **17**(6), 1223-1263. <https://doi.org/10.1162/0899766053630350>
- [29] Connor, J. T., Martin, R. D., & Atlas, L. E. (1994). Recurrent neural networks and robust time series prediction. *IEEE transactions on neural networks*, **5**(2), 240-254. <https://doi.org/10.1109/72.279188>
- [30] Mandic, D. P., & Chambers, J. (2001). *Recurrent neural networks for prediction: learning algorithms, architectures and stability*. John Wiley & Sons, Inc.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet porte sur l'évaluation et l'amélioration des performances du procédé de traitement thermique superficiel par laser. Il vise comme objectif le développement d'une stratégie d'optimisation prédictive des performances de ce procédé à travers une investigation expérimentale et numérique structurée et une modélisation prédictive par réseau de neurones dans le cas de traitements thermiques de plaques d'acier AISI 4340 utilisant différents modèles de balayage. Afin de réaliser un tel objectif, une approche en trois phases a été adoptée.

La première phase a permis de mener une investigation expérimentale ayant conduit à l'évaluation et l'analyse des effets des paramètres de chauffage, des différents modèles de balayage et de leurs interactions sur les profils de dureté et sur les caractéristiques des surfaces durcies. L'expérimentation a été conduite selon des plans d'expériences structurés appliqués à des plaques en acier AISI 4340 en utilisant une source laser Nd:Yag de 3 kW. Quatre modèles de balayage soient linéaire, sinusoïdal, triangulaire et trochoïde ont été combinés à des paramètres du procédé, tels que la puissance du laser et la vitesse de balayage pour évaluer la variation de la profondeur et de la largeur durcies. Des graphes des effets moyens, les pourcentages de contribution, le test Fischer, l'analyse de régression, l'analyse de corrélation et la méthodologie de surface de réponse ont été utilisés pour analyser les performances de chaque combinaison de paramètre et de chaque modèle de balayage. Les résultats ont montré que la puissance du laser et la vitesse de balayage ont manifestement des effets de mêmes natures sur les profondeurs et sur les largeurs durcies peu importe les modèles de balayage utilisés. Les interactions entre la puissance du laser et la vitesse de balayage ont peu d'effets sur les profils de dureté. Les résultats ont également montré que le balayage sinusoïdal permet d'avoir une largeur maximale et une profondeur limitée caractérisées par une distribution relativement uniforme de la dureté. Le balayage linéaire offre une profondeur maximale avec une largeur très limitée. Le balayage trochoïde présente un bon compromis entre profondeur et largeur durcies. Cependant, il présente une distribution de dureté irrégulière et une profondeur durcie non uniforme. Par conséquent, si un maximum de largeur durcie est requis, il est recommandé d'utiliser le modèle de balayage sinusoïdal.

La seconde phase a permis de développer un modèle numérique 3D pour l'analyse thermique du procédé de traitement thermique de surface par laser dans le but de conduire des simulations du comportement du procédé dans des conditions n'ayant pas été considérées dans l'expérimentation. Le modèle numérique est basé sur la méthode d'analyse par éléments finis. Les simulations réalisées résultent d'une planification structurée selon la méthode Taguchi. La distribution de la température et les profils de dureté ont été utilisés pour évaluer les effets des paramètres de chauffage, des caractéristiques des modèles de balayage et de leurs interactions sur les caractéristiques des surfaces durcies. L'étalonnage et la validation du modèle 3D ont été réalisés en utilisant les données expérimentales obtenues lors de la phase précédente. Les simulations numériques révèlent que le modèle 3D est capable d'estimer les caractéristiques de la surface durcie avec des erreurs maximales ne dépassant pas 9,1%. La précision du modèle est confirmée par des coefficients de détermination compris entre 95 et 98%. L'erreur maximale est observée dans le cas des balayages linéaire et sinusoïdal. Le balayage trochoïdal présente les meilleurs résultats avec respectivement 3,7, 2,3 et 1,00% comme erreur maximale, moyenne et minimale. Les écarts observés proviennent principalement d'erreurs expérimentales ainsi que de certaines hypothèses prises en compte lors de la construction du modèle 3D. Globalement, les résultats démontrent que le modèle numérique peut effectivement conduire à des estimations précises et cohérentes des caractéristiques de surface durcie même avec des paramètres de chauffage et des modèles de balayage variables.

La troisième phase a permis de développer la stratégie d'optimisation prédictive du procédé de traitement thermique de surface par laser dans le cas de différents modèles de balayage. La stratégie d'optimisation est basée sur les réseaux de neurones artificiels pour développer des modèles directs et inverses du procédé susceptibles d'aider à synthétiser les paramètres à utiliser pour obtenir les caractéristiques désirées pour la surface durcie selon le modèle balayage choisi. Le développement et la validation des modèles directs et inverses du procédé sont basés sur des données issues à la fois de l'expérimentation et des simulations 3D combinées de façon structurées en utilisant la méthode Taguchi. Quatre procédures d'apprentissage et de validation ont été proposées pour améliorer le processus de modélisation. Plusieurs outils statistiques éprouvés ont été utilisés pour évaluer la précision et la capacité de généralisation des modèles développés.

Les résultats obtenus révèlent d'excellentes performances et démontrent la pertinence de la stratégie d'optimisation proposée. Les modèles prédictifs directs présentent des erreurs relatives maximales inférieures à 9.7% pour les profondeurs durcies et à 9,5% pour les largeurs durcies. Les modèles inverses sont en mesure d'identifier les paramètres optimaux avec des erreurs relatives maximales inférieures à 5%. La validation révèle que la puissance du laser peut être prédite avec une précision de plus de 98% tandis que la précision de prédiction de la vitesse de balayage est d'environ 97%. Ces résultats démontrent que la stratégie d'optimisation proposée basée sur un modèle de processus inverse peut effectivement conduire à des résultats pratiques et cohérents. Les effets d'autres paramètres tels que la fréquence, la géométrie et le diamètre du point focal peuvent faire l'objet de recherches supplémentaires.

Bien que ces résultats soient très satisfaisants, des investigations numériques et expérimentales additionnelles sont souhaitables pour enrichir les données disponibles et raffiner l'analyse des effets des différents paramètres et différents modèles de balayage sur les caractéristiques de la surface durcie afin d'améliorer les modèles et la stratégie d'optimisation. Il serait également pertinent de mener des études approfondies sur d'autres paramètres tels que la fréquence, l'amplitude et/ou le diamètre de la tache focale. Cela permettra de maîtriser davantage les paramètres géométriques qui définissent les différents patrons et de les inclure dans l'analyse des effets. L'application de ces techniques de balayage sur des pièces à géométries complexes serait également une valeur ajoutée intéressante dans ce contexte.





## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Altergott, W., and Patel, P. (1982). Spur Gear Laser Surface Hardening MM & T Program. Illinois Institute of Technology, 120. doi:<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA114670.pdf>
- Ashby, M. F., and Easterling, K. E. (1984). The transformation hardening of steel surfaces by laser beams—I. Hypo-eutectoid steels. *Acta Metallurgica*, 32(11), 1935,1939-1937,1948. doi:[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90175-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90175-5)
- Caron-Guillemette, G. (2013). Modélisation du procédé de trempe au laser appliqué à des composantes mécaniques complexes. Mémoire. Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Département de mathématiques, informatique et génie, 237 p. doi: <http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/989>
- Dausinger, F., and Jialin, S. (1993). Energy coupling efficiency in laser surface treatment. *ISIJ International*, 33, 925-933. doi:<https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.925>
- De La Cruz, P., Odén, M., and Ericsson, T. (1998). Effect of laser hardening on the fatigue strength and fracture of a B-Mn steel *International Journal of Fatigue*, 20, 389-398.
- Farrahi, G. H., and Sistaninia, M. (2009). Thermal analysis of laser hardening for different moving patterns. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*, 22(2), 169-180.
- Grum, J., and Sturm, R. (1998). Influence of laser surface melt-hardening conditions on residual stresses in thin plates. *Surface & Coatings Technology*, 100, 455-458. doi:[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00670-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00670-1)
- Billaud, G. (2016). Simulation et validation expérimentale du traitement thermique superficiel au laser appliqué à des géométries complexes. Mémoire de maîtrise, Université de Duébec à Rimouski. <http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1162>
- Murry, G. (1993). *Aciers. Généralités. Techniques de l'ingénieur Propriétés et usages des aciers et des fontes*, base documentaire : TIB349DUO(ref. article : m300).
- Henry, G., and Philibert, J. (1970). Mécanisme de l'action du bore dans les aciers inoxydables austénitiques. *Mem Sci Rev Met*, 67(4), 233-251.
- Ion, I., and John, C. (2005). *Laser processing of engineering materials : principles, procedure and industrial application*. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann. xviii, 556.
- Josee, C. (2008). *Caractérisation de la fraction solide dans les lopins semi-solides produits par le procédé SEED*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. ProQuest Dissertations Publishing.

- Labuschage, K. (2006). Investigative Study of Martensite Formation in Laser Transformation Hardened Steels. Tshwane University of Technology, 206.
- Laffitte, F. (1987). Généralités et principes de fonctionnement d'un laser. Soins Chirurgie (Paris, France : 1982), 81, 4-7.
- Lakhkar, R. S., Shin, Yung C., and Krane, Matthew John M. (2008). Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel. *Materials Science & Engineering A*, 480(1), 209-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.054>
- Lévêque, R. (2013). Traitements et revêtements de surface des métaux. DUNOD.
- Maamri, I., (2015). Prédiction du profil de dureté de l'acier AISI 4340 traité thermiquement au laser. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski. <http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1183>
- Meijer, I., and Van, S. (1991). Optimization of Laser Beam Transformation Hardening by One Single Parameter *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40, 183-186. doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61963-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61963-5)
- Mioković, T., Schulze, V., Vöhringer, O., and Löhe, D. (2006). Prediction of phase transformations during laser surface hardening of AISI 4140 including the effects of inhomogeneous austenite formation. *Materials Science & Engineering A*, 435, 547-555. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.037>
- Philibert, J., Vignes, A., Bréchet, Y., & Combrade, P. (1999). *Métallurgie du minerai au matériau* (Book Review). 24, 404-404. [https://doi.org/10.1016/S0151-9107\(99\)80084-1](https://doi.org/10.1016/S0151-9107(99)80084-1)
- Ready, J.F. and Farson, D.F. (2001). *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. LIA Magnolia Publishing Inc.
- Safdar, S., Li, L., Sheikh, M. A., and Liu, Z. (2006). An analysis of the effect of laser beam geometry on laser transformation hardening, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, 659-667. doi:<https://doi.org/10.1115/1.2193547>
- Seifert, M., Bonf, M., Brenner, B., and Beyer, S. (1988). High power diode laser beam scanning in multi-kilowatt range. *Proceedings of the 23rd International Congress Applications of Lasers and Electro-optics*. doi:<https://doi.org/10.2351/1.5060199>
- Selvan, J. S., Subramanian, K., and Nath, A. K. (1999). Effect of laser surface hardening on En18 (AISI 5135) steel. *Journal of Materials Processing Tech.*, 91(1), 29-36. doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00430-0)
- Shibata, K., Sakamoto, M., and Matsuyama, H. (1992). Absorptivity of polarized beam during laser hardening. *Proceedings of the International Congress. Applications of Lasers and Electro-optics*, 409-413.

- Sistaninia, M. (2009) Laser Heat Treatment of Metals using Rotating and Dithering Beams. *Recent Advances in Technologies*, IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/7396>
- Steen, W. (2003). *Laser Material Processing*. 3eme édition. London: Springer., 408.
- Storrie-Lombardi, M. C., Hug, W. F., McDonald, G. D., Tsapin, A. I., & Nealson, K. H. (2001). Hollow cathode ion lasers for deep ultraviolet Raman spectroscopy and fluorescence imaging. *Review of Scientific Instruments*, 72(12), 4452-4459. doi:<https://doi.org/10.1063/1.1369627>
- Straffelini, G., Menapace, C., and Molinari, A. (2002). Interpretation of effect of matrix hardening on tensile and impact strength of sintered steels. *Powder Metallurgy*, 45(2), 167-172. doi: <https://doi.org/10.1179/003258902225002587>
- Tan, T., and Zhou, H. (2013). Numerical Solution for a Transient Temperature distribution on a Finite Domain Due to a Dithering or Rotating Laser Beam *International Journal of Operations Research and Information Systems*, 4, 22 - 38. doi: <http://dx.doi.org/10.4018/ijoris.2013100102>
- Tani, G., Orazi, L., and Fortunato, A. (2008). Prediction of hypo eutectoid steel softening due to tempering phenomena in laser surface hardening. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 209-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.057>
- Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook (Vol. 2)*: CRC press.
- Xue, L., Islam, M. U., and McGregor, G. (1999). Dot Matrix Hardening of Steels Using a Fiber Optic Coupled Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials and Manufacturing Processes*, 14(1), 53-65. doi:<https://doi.org/10.1080/10426919908914804>
- Zhou, H. (2011). Temperature Rise induced by a Rotating or Dithering Laser Beam. *Adv. Studies Theor. Phys.*, 5, 443 - 468.