



Université du Québec
à Rimouski

PRÉDICTION DU PROFIL DE DURETÉ SUR DES CANNELURES TRAITÉES THERMIQUEMENT AU LASER — MODÈLE 3D ET RÉSEAUX DE NEURONES

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

© **Mahdi Hadhri**

Mai 2016

Composition du jury :

Adrian Ilinca, Ph.D., ing., président du jury, professeur (UQAR)

Abderrazak El Ouafi, directeur de recherche, professeur (UQAR)

Hussein Ibrahim, examinateur externe, (Technocentre Éolien)

Dépôt initial le [16-5-2016]

Dépôt final le [15-06-2016]

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 ma famille

REMERCIEMENTS

C'est avec un grand plaisir que je consacre ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à rendre un grand hommage à mon directeur de recherche : Mr El Ouafi Abderrazak qui a suivi de près ce projet avec le sérieux et la compétence qui le caractérisent. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de porter au projet, pour sa disponibilité et pour le soutien qu'il m'a prodigué. Je tiens à remercier également Mr Noureddine Barka pour les intéressantes discussions que nous avons eues et pour ses conseils avisés.

Je tiens finalement à remercier ma femme, ma famille et tous mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

AVANT-PROPOS

Ce projet a été réalisé au Laboratoire de recherche Productique à l'Université du Québec à Rimouski. Il est présenté sous la forme d'un mémoire par articles. Le premier chapitre présente une introduction générale concernant le problème du traitement thermique superficiel par laser ponctuée par une revue de la littérature pertinente dans le domaine. Les trois articles, en guise de deuxième, troisième et quatrième chapitres, constituent le cœur du mémoire. Le cinquième et dernier chapitre présente une conclusion générale et quelques pistes à considérer pour la poursuite de ce projet.

RÉSUMÉ

Ce mémoire porte sur le développement d'un modèle pour la prédiction du profil de dureté sur des pièces mécaniques de géométries complexes traitées thermiquement par laser. Il présente les résultats d'une investigation sur les effets thermiques et métallurgiques induits par les propriétés des matériaux et par les paramètres du système de traitement thermique au laser sur la dureté surfacique et la profondeur durcie en vue de développer une approche prédictive intégrée du profil de dureté. L'approche proposée est structurée en plusieurs étapes combinant modélisation thermique, modélisation métallurgique, simulation, planification expérimentation, analyse statistique et réseaux de neurones artificiels pour aboutir à un modèle prédictif global du profil de dureté. Cette combinaison permet, d'une part de minimiser les coûts des efforts expérimentaux et, d'autre part, de favoriser une meilleure compréhension du comportement du procédé sous différentes conditions pour une modélisation prédictive structurée et efficace.

La première étape a permis de développer et valider expérimentalement un modèle de simulation 3D et un modèle prédictif simplifié basé sur les réseaux de neurones du profil de dureté pour une géométrie simple. La seconde étape a permis d'adapter le modèle 3D à des géométries complexes telles que les cannelures et de le valider expérimentalement. La troisième étape a permis de réaliser une analyse structurée des effets des propriétés du matériau, des différents paramètres du système de traitement thermique au laser et des attributs géométriques de la pièce traitée sur la dureté surfacique, sur la profondeur durcie et sur le profil de dureté. Finalement, tous les paramètres ayant les effets les plus significatifs sur la variation du profil de dureté ont été intégrés dans un modèle prédictif global en utilisant un modèle neuronique.

La validation expérimentale des différents modèles a été réalisée sur un système de traitement thermique au laser Nd : Yag de 3 kW et appliquée à l'acier AISI4340. Les résultats obtenus ont permis de confirmer, non seulement, la faisabilité de l'approche, mais également

de confirmer son efficacité en conduisant à un modèle de prédiction aussi bien précis que fiable.

Mots clés : [Traitement thermique de surface par laser ; Profondeur de durcissement ; Profil de dureté ; Modèle prédictif ; Modèle 3D ; Méthode des éléments Finis ; Planification d'expériences ; ANOVA ; Réseau de Neurones]

ABSTRACT

This project focuses on the development of a robust model for predicting the hardness profile in mechanical parts with complex geometries heat-treated by laser. An investigation on thermal and metallurgical effects induced by material properties and laser heating system parameters on the surface hardness and hardness depth is conducted to develop an integrated approach for predictive modeling of hardness profile. The proposed approach is structured in several phases combining thermal modeling, metallurgical modeling, simulation, experiment planning, statistical analysis and artificial neural networks to reach a global predictive model. This integrated approach offers the advantage of minimizing the experimental cost and stimulating a better understanding of the process quality variation under various parameters and conditions leading to an effective predictive modeling.

In the first step, a 3D simulation model and a simplified neural networks based model for predicting the hardness profile for a simple geometries such as cylinder are developed and experimentally validated. In the second step, the 3D model is adapt and experimentally validate for complex geometries such as spline shafts. In the third step, a structured analysis is conducted to evaluate the effects of material properties, the geometric attributes of the treated mechanical parts and various laser heating system parameters on the surface hardness, the hardness depth and the hardness profile. Finally, the parameters having the most significant impact on the hardness profile variation are integrated using neural networks for the global predictive model.

The experimental calibration and validation of various models is performed on a 3 kW Nd:Yag laser system applied to AISI4340 steel using a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools. The results confirmed not only the feasibility of the approach but revealed its effectiveness by leading to an accurate and effective prediction model.

Keywords: [Laser surface transformation hardening; Case depth; Hardness profile; Predictive modeling; 3D model; Finite elements method; Design of experiments; ANOVA; Neural Network]

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
AVANT-PROPOS.....	x
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
LISTE DES FIGURES.....	xx
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	24
CHAPITRE 1 PRÉDICTION DU PROFIL DE DURETÉ D’UN ARBRE CANNELÉ EN ACIER 4340 TRAITÉ THERMIQUEMENT PAR LASER EN UTILISANT LE MODÈLE 3D, VALIDATION EXPÉRIMENTALE ET RÉSEAUX DE NEURONES.....	34
1.1 RESUME EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	34
1.2 ABSTRACT.....	36
1.3 INTRODUCTION.....	36
1.4 FINITE ELEMENT MODELING.....	38
1.5 METALLURGICAL MODELING.....	39
1.6 SIMULATION RESULTS.....	41
1.7 EXPERIMENTAL VALIDATION.....	44
1.8 STATISTICAL ANALYSIS.....	46
1.9 ARTIFICIAL NEURAL NETWORK.....	48
1.10 CONCLUSION.....	52
1.11 REFERENCES.....	53

CHAPITRE 2 PRÉDICTION DE PROFIL DE DURETÉ D'UN ARBRE CANNELÉ EN ACIER 4340 TRAITÉ THERMIQUEMENT PAR LASER — MODÈLE 3D ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE	55
2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE	55
2.2 ABSTRACT	57
2.3 INTRODUCTION	58
2.4 FINITE ELEMENT MODELLING	61
2.5 METALLURGICAL MODELING	63
2.6 SIMULATION RESULTS	64
2.7 EXPERIMENTAL VALIDATION	67
2.8 STATISTICAL ANALYSIS	69
2.9 CONCLUSION	71
2.10 REFERENCES	72
CHAPITRE 3 EFFETS DES PARAMÈTRES DE LA MACHINE ET DES PARAMÈTRES DE CONCEPTION SUR LA PROFONDEUR DE DURCISSEMENT D'UN ARBRE CANNELÉ EN ACIER 4340 TRAITÉ THERMIQUEMENT PAR LASER — ANALYSE STATISTIQUE ET RÉSEAU DE NEURONES.....	74
3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE	74
3.2 ABSTRACT	76
3.3 INTRODUCTION	76
3.4 EXPERIMENTAL SETUP	79
3.5 EXPERIMENTAL DESIGN	80
3.6 EXPERIMENTAL RESULTS	81
3.7 STATISTICAL ANALYSIS	82
3.8 PREDICTION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK	84
3.9 CONCLUSION	87
3.10 REFERENCES	88

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	89
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	93

LISTE DES TABLEAUX

TABLE 1: Chemical composition of 4340 steel.	42
TABLE 2: Material properties.....	42
TABLE 3: Validation Test	45
Table 4: Factors representation	47
TABLE 5: Experimental Test (L27 orthogonal).....	47
Table 6: Variance analysis case of depth (D_2)	47
Table 7: Factors and study field	49
Table 8: Factors and validation field.....	51
Table 9: Coefficient of determination	51
Table 10: Validation test of the neuronal network.....	51
Table 11: Chemical composition of steel AISI 4340	65
Table 12: Material properties	66
Table 13: Validation Test.....	67
Table 14: Experimental planning	69
Table 15: Variance analysis case of depth (D_i).....	70
Table 16: Variance analysis case of depth (D_f).....	71
Table 17: Factors and study field	80
Table 18: Variance analysis case of depth (D_i).....	83

Table 19: Variance analysis case of depth (D_f)	84
Table 20: Coefficient of determination.....	85
Table 21: Factors and validation data	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Configuration de base du durcissement laser d'une plaque. (Lakhkar, R., 2007).....	27
Figure 2 : Configuration de base du durcissement laser d'une pièce cylindrique. (Skvarenina, 2006)	27
Figure 3 : Trempe sur acier 50CD4 et filiation de dureté sur trois passes laser.....	28
Figure 4 : Approche adoptée pour le développement du modèle de prédiction du profil de dureté	32
Figure 5 : Simulation results-Temperature distribution	41
Figure 6: Simulation results-Heat Flux distribution.....	41
Figure 7: The influence of laser power on the temperature.....	43
Figure 8: The influence of rotational speed on the temperature	43
Figure 9: The influence of the scanning speed on the temperature	44
Figure 10: Experimental setup	45
Figure 11: Experimental validation of the hardened depth	45
Figure 12: Typical hardness curve—Tests 1	46
Figure 13: Effect of the parameters on the depth (D_2)	48
Figure 14: Typical basic hardness curve	49
Figure 15: Scatter plots of simulation and prediction of $\{D_1, D_2\}$	50
Figure 16: Scatter plots of simulation and prediction of H_1	50
Figure 17: Validation results for the ANN prediction model.....	52

Figure 18: Basic Configuration of the laser hardening a cylindrical piece.	61
Figure 19: Distribution of Temperature.....	65
Figure 20: Distribution of Heat Flux	65
Figure 21: The Evolution of Temperature Versus Time ($x=5, y=0, z=15$)	66
Figure 22: Experimental setup—robotic laser cell.	67
Figure23: Test hardness Curve1	68
Figure24: Test hardness Curve2	68
Figure 25: Effect of the parameters on the depth (D_t)	70
Figure 26: Effect of the parameters on the depth (D_f)	71
Figure 27: Distribution of Temperature and Heat Flux ($t=1.58s$).....	78
Figure 28: Design parameters of splined shafts.....	78
Figure 29: Experimental setup.....	79
Figure 30: Hardness profile —2500 W, 4 mm/s and 2000 RPM	81
Figure 31: Hardness profile —1900 W, 2 mm/s and 1500 RPM	81
Figure 32: Hardness tooth curves	82
Figure 33: Hardness flank curves	82
Figure 34: Effect of the parameters on the depth (D_t)	83
Figure 35: Effect of the parameters on the depth (D_f)	84
Figure 36: Scatter plots simulation and prediction (D_t).....	85
Figure 37: Scatter plots simulation and prediction (D_f).....	86
Figure 38: Predicted and measured hardened depth (D_t).....	86
Figure 39: Predicted and measured hardened depth (D_f).....	87

INTRODUCTION GÉNÉRALE

MISE EN CONTEXTE

Les traitements thermiques de surface sont des procédés qui visent à conférer la surface des pièces mécaniques des propriétés différentes dans le but d'améliorer leur résistance à l'usure et à la fatigue en durcissant les zones critiques superficielles par des apports thermiques rapides localisés. Ces procédés se distinguent généralement par la nature de la source thermique mise en jeu. L'apport rapide d'énergie thermique impose des puissances surfaciques importantes pour limiter la diffusion thermique. Le durcissement superficiel par induction est l'un des procédés de traitement thermique de surface qui a connu le plus de succès au cours des trente dernières années. L'intérêt de ce procédé est lié à ses avantages techniques et économiques : un apport énergétique modulable, des cycles rapides et non polluants permettant l'intégration dans des chaînes de fabrication et une qualité de durcissement reproductible. L'adoption de ce procédé par l'industrie automobile a favorisé son développement rapide par la mise au point de générateurs et d'inducteurs adaptés aux fortes cadences. Pourtant, il existe d'autres procédés de traitements thermiques de surface capables de produire des puissances surfaciques importantes et permettant des localisations énergétiques plus précises que l'induction. Il s'agit principalement des procédés aux lasers, faisceaux d'électrons et torches plasma. Certains de ces procédés commencent à faire l'objet d'applications industrielles. Cependant, malgré des coûts d'investissement de plus en plus abordables, ces procédés sont encore largement limités à des applications spécifiques.

Le traitement thermique de surface au laser offre des cycles thermiques rapides, localisés et précis tout en limitant les risques de déformations indésirables (Goia, F, 2011). Typiquement, le mécanisme du durcissement de surface par laser est comparable à un traitement thermique conventionnel. L'application d'une quantité d'énergie augmente très

rapidement la température de surface (jusqu'à 1000 °C/s), qui transforme la couche superficielle en austénite. La transformation martensitique de l'acier est obtenue grâce à un refroidissement rapide provoqué par la conduction thermique dans la masse de la pièce (Chattopadhyay, R, 2004). Le procédé de traitement thermique de surface par laser offre plusieurs avantages (Tobar, M. J, 2006) :

- Traitement très localisé, offrant une grande précision des zones transformées ;
- Zone affectée thermiquement relativement circonscrite limitant les modifications métallurgiques, les contraintes résiduelles et les déformations de la pièce ;
- Cycle thermique très rapide et une trempe autogène ;
- Traitement de surfaces et de formes complexes grâce à la flexibilité des robots et du transfert du faisceau laser par fibre optique ;
- Excellente qualité de traitement nécessitant peu ou pas de reprise d'usinage ;
- Grande flexibilité et facilité d'automatisation et d'intégration dans des chaînes de production complexes grâce aux robots.

Malgré tous ces avantages, le traitement de surface par laser ne représente encore qu'un très faible pourcentage des installations industrielles. Après seulement quelques années de développement, il est encore à ses premiers pas et n'est adopté que dans quelques applications dans l'aéronautique et l'automobile. Ce projet constitue une contribution aux efforts de développement de nouvelles connaissances, applications et pratiques du traitement thermique de surface au laser.

PROBLÉMATIQUE

Les propriétés mécaniques et les attributs géométriques de la zone durcie obtenue par le traitement thermique de surface au laser dépendent de plusieurs facteurs (propriétés

physico-chimiques du matériau à traiter, paramètres de la source de laser et conditions de traitement). Pour être en mesure d'exploiter adéquatement les ressources qu'offre ce procédé, il est nécessaire de développer des approches aussi bien théoriques qu'expérimentales dans le but de mieux comprendre le comportement du procédé et de proposer des stratégies permettant de contrôler l'ensemble de ces facteurs de manière à produire avec précision les caractéristiques désirées pour la surface durcie sans recourir au traditionnel long et coûteux processus essai-erreur.

Plusieurs travaux ont été réalisés à cet effet. Les premières recherches se sont intéressées au développement de modèles numériques 2D et 3D pour être en mesure de simuler le procédé de traitement de surfaces sur des pièces en acier. Ces modèles ont permis de comprendre l'influence de certains paramètres (vitesse de balayage, puissance du laser, longueur d'onde, diamètre de faisceau, etc.) sur le niveau et sur la distribution des températures générées et d'évaluer comment ces conditions peuvent affecter la dureté et la profondeur de traitement sur des géométries simples, notamment planes, pour quelques types de matériaux (Dinesh, B, 2012). Plusieurs modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis ont été proposés à cet effet. Les plus cités sont ceux reposant sur l'équation de Rosenthal pour des sources de chaleur en mouvement tel qu'illustré à la figure 1 (Lakhkar, R., 2007) et (Xia, M, 2008). D'autres recherches se sont intéressées à la modélisation de la distribution de la température sur des pièces cylindriques (figure 2) pour la prédiction soit de la microstructure résultant de la profondeur de durcissement qu'il est possible d'atteindre, soit de la dureté à la surface soit encore des contraintes résiduelles que le procédé pourrait engendrer.

À titre d'exemple, le modèle par éléments finis 3D proposé par Rahul Patwa et al (Patwa, R, 2007) est repris par plusieurs autres chercheurs. Ce modèle propose une solution numérique tridimensionnelle transitoire basée sur la modélisation de Rozzi et al (Rozzi, 2000) pour un cylindre en rotation soumis à source laser en translation. Avec les résultats de simulations, les auteurs montrent, expériences à l'appui, qu'il est possible de prédire la dureté avec une assez bonne précision. Ils ont atteint une profondeur de 0,54 mm avec une dureté

de 63 HRC sur une éprouvette d'acier AISI 5150 en utilisant une puissance laser d'à peine 500 W avec une vitesse de rotation de 6 tr/min. Skvarenina et al ont réussi à développer et valider expérimentalement un modèle pour prédire la profondeur de durcissement dans le cas d'un cylindre d'acier AISI 1536 de 60 mm de diamètre. La profondeur de durcissement a atteint 2,5 mm avec une dureté uniforme de 57 HRC en utilisant une vitesse de balayage de 2,9 mm/s, une puissance de 1220 W et une vitesse de rotation de 1 tr/min [14]. Le modèle de transition thermique basé sur la géométrie des taches en anneau développé par Leonardo Orazi *et al* (Orazi, L, 2014) permet d'atteindre des vitesses de rotation relativement élevées. Ce modèle est validé par des essais expérimentaux avec une vitesse de rotation 1140 tr/min, une puissance de 1 kW, une vitesse de balayage

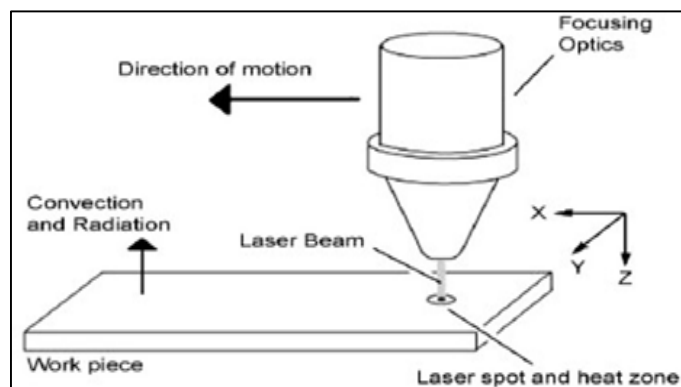


Figure 1 : Configuration de base du durcissement laser d'une plaque. (Lakhkar, R., 2007)

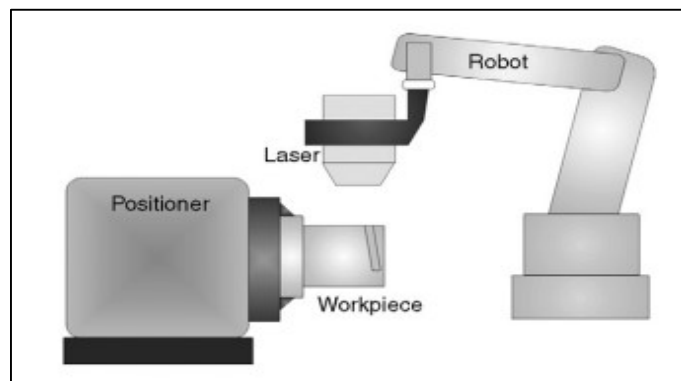


Figure 2 : Configuration de base du durcissement laser d'une pièce cylindrique. (Skvarenina, 2006)

égale à 30 mm/min et une éprouvette en acier AISI 1040 de diamètre 30 mm. Les résultats présentent une dureté de 690 HV et une meilleure qualité de microstructure par rapport au traitement thermique à petite vitesse de rotation. Il est à noter que quels que soient le matériau et le taux de recouvrement, le 2e passage du laser engendre un revenu du matériau qui se caractérise par une chute du micro dureté. Tel qu'illustré par la figure 3, le traitement à faible vitesse engendre une superposition entraînant une micro dureté totalement non homogène (Maupertuis, 2011). Il apparaît clairement que les grandes vitesses de rotation améliorent la qualité de traitement thermique. Cependant en l'absence d'études approfondies sur l'influence de la grande vitesse, cette hypothèse reste à valider. De plus, à part quelques cas sur les engrenages, les recherches disponibles n'ont que rarement abordé les effets de la vitesse sur le profil de dureté et sur la qualité du traitement pour des géométries complexes.

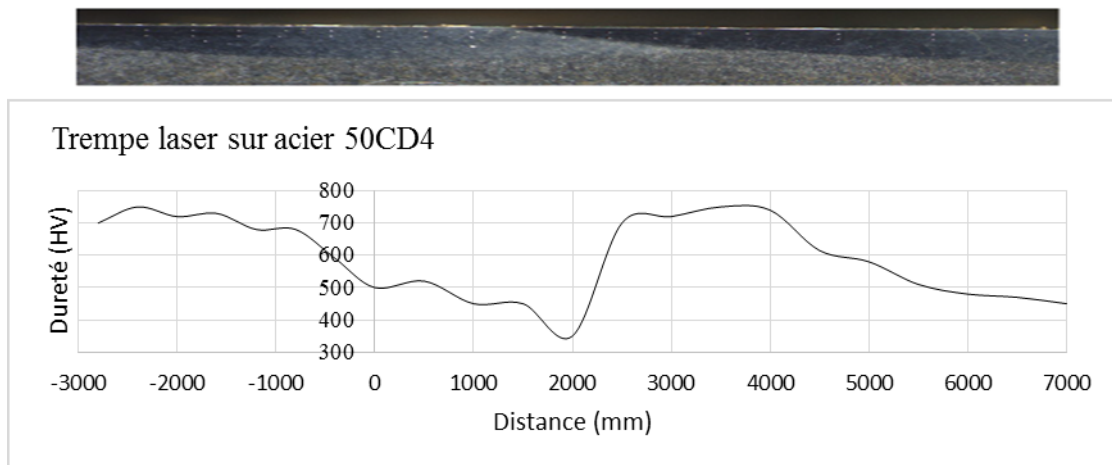


Figure 3 : Trempe sur acier 50CD4 et filiation de dureté sur trois passes laser

Les travaux de Benedict et Eskildsen ont conduit à un brevet prometteur en rapport avec le traitement d'engrenages de petites tailles (Benedict, G. F., & Eskildsen, 1985). Le procédé utilisé se compose d'un faisceau laser balayant la tête des dents de la roue dentée avec une variation de l'angle d'incidence, de la puissance et du temps d'interaction. Zhang et al ont utilisé une approche différente pour traiter un pignon de 98 mm de diamètre extérieur avec 23 dents. Ils ont installé sur un montage permettant à la roue d'être déplacée latéralement et d'être en mouvement de rotation (Zhang, H. 2003). Les résultats de cette

étude semblent concluants. La profondeur des flancs durcis présente une épaisseur relativement uniforme et sans aucune fusion constatée en surface. Cependant, l'étude est strictement expérimentale et ne présente pas de modèle pour le procédé. Pretorius et Vollertsen ont réalisé un modèle simplifié pour le traitement d'une roue dentée (Pretorius et Vollertsen, 2009). Le modèle numérique 3D a été développé en utilisant le paquet SYSWELD pour modéliser le flux thermique, les transformations métallurgiques et les déformations géométriques. Cependant, le traitement n'a été appliqué que sur la racine de la dent.

À la lumière de ces références, il est clair que les travaux de recherche sur le traitement thermique par laser sur les pièces mécaniques de géométries complexes tels que les engrenages et les cannelures sont très rares. L'absence d'une méthodologie établie pour étudier le comportement de ce procédé en fonction des différents types de matériaux, des attributs géométriques des pièces à traiter et des nombreux paramètres du système de traitement explique en partie le retard constaté au niveau de l'intégration de ce procédé de façon efficace dans l'industrie manufacturière. Pour contribuer à combler ce retard, ce projet propose une nouvelle approche pour la prédiction du profil de dureté sur pièces mécaniques de géométries complexes traitées thermiquement par laser.

OBJECTIFS

L'examen de la littérature dans le domaine du traitement thermique de surface au laser indique clairement que les efforts pour étudier le phénomène de traitement thermique superficiel pour les géométries complexes sont limités. Les modèles proposés sont limités à des applications et à des matériaux spécifiques. De plus, les propriétés mécaniques de la zone durcie obtenue par le traitement thermique de surface au laser dépendent des propriétés physico-chimiques du matériau à traiter de plusieurs paramètres de la source de laser et d'une grande variété des conditions de traitement. Pour être en mesure d'exploiter adéquatement les ressources qu'offre le procédé, il est nécessaire de développer des stratégies permettant

de contrôler ces paramètres de manière à produire avec précision les caractéristiques désirées pour la surface durcie. L'objectif du projet consiste donc à développer des modèles prédictifs capables de produire des estimés quantitatifs des attributs physiques et géométriques de la surface durcie (dureté, profondeur durcie et profil de dureté) dans le cas de traitement thermique de pièces en acier AISI 4340 avec des géométries complexes. Pour arriver à des modèles prédictifs consistants, trois objectifs spécifiques sont adoptés. Le premier consiste à développer un modèle 3D pour une géométrie cylindrique simple et à le valider expérimentalement. Cette étape a permis d'analyser les effets des différents paramètres sur le profil de dureté en se basant sur une expérimentation structurée combinée à des techniques éprouvées d'analyse statistique. Les résultats de cette étude ont conduit à l'identification des variables les plus pertinentes à exploiter dans un premier modèle prédictif simplifié. Le second objectif consiste à enrichir le modèle 3D et à l'adapter à des géométries complexes avant de le valider expérimentalement. Le troisième consiste à combiner les données expérimentales aux modèles 3D pour conduire une campagne de simulation dans le but d'évaluer et analyser les relations de dépendance entre le profil de dureté et les paramètres du procédé. Les résultats de cette analyse constituent la base de l'établissement du modèle neuronique prédictif global.

MÉTHODOLOGIE

Ce projet propose une nouvelle approche pour étudier le traitement thermique de surface au laser pour des pièces mécaniques de géométries complexes en se basant sur la modélisation par éléments finis, la validation des modèles expérimentaux, l'étude de sensibilité des différents paramètres en se basant sur des méthodes statistiques éprouvées et finalement la modélisation prédictive en utilisant les réseaux de neurones. La nouvelle approche combine la recherche fondamentale et la recherche appliquée afin d'offrir à l'industrie un outil simple et efficace pour la prédiction de la qualité du traitement de surface au laser. Le choix de l'acier 4340 et des cannelures comme géométrie n'est pas arbitraire. Il

tient compte de besoins industriels spécifiques, notamment dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique.

L'approche proposée repose sur une méthodologie structurée en cinq étapes : (i) la modélisation thermique et métallurgique du procédé pour des géométries simples, (ii) l'expérimentation et la validation du modèle (iii) l'adaptation du modèle pour des géométries complexes, (iv) la simulation et l'étude de sensibilité et (v) la modélisation par réseaux de neurones. La Figure 4 présente une représentation schématique des principaux éléments de l'approche de prédiction de profil de dureté.

Cette approche est adoptée suite à une étude attentive de la littérature dans le domaine qui montre qu'il existe peu de travaux touchant la modélisation et la simulation du traitement thermique superficiel par laser pour des pièces de géométries complexes. De plus, il n'existe pas d'études spécifiques pour le traitement des arbres cannelés. En ce qui concerne la modélisation, la littérature rapporte qu'il existe trois manières pour représenter une source de chaleur mobile. Comme présenté dans la figure 5, la première méthode est basée sur l'équation Rosenthal d'une source de chaleur mobile (Resendiz-Flores, E, 2015). La deuxième consiste à déplacer la source implicitement en se basant sur le terme de transport dans l'équation de la chaleur (Toyserkani, E, 2004). La dernière méthode représente une approche de secteur. Dans tous les cas, la géométrie la pièce traitée constitue un facteur primordial (Safdar, S. 2007).

Si l'approche implicite est efficace pour des géométries simples et l'approche de secteur est surtout applicable lorsque le mouvement est simple et que les surfaces courbes de la géométrie peuvent être approximées par des surfaces planes, l'approche de Rosenthal est efficace avec des géométries complexes et des mouvements complexes. Cependant, le défi principal est d'être en mesure de contrôler de façon précise la trajectoire de la source de chaleur.

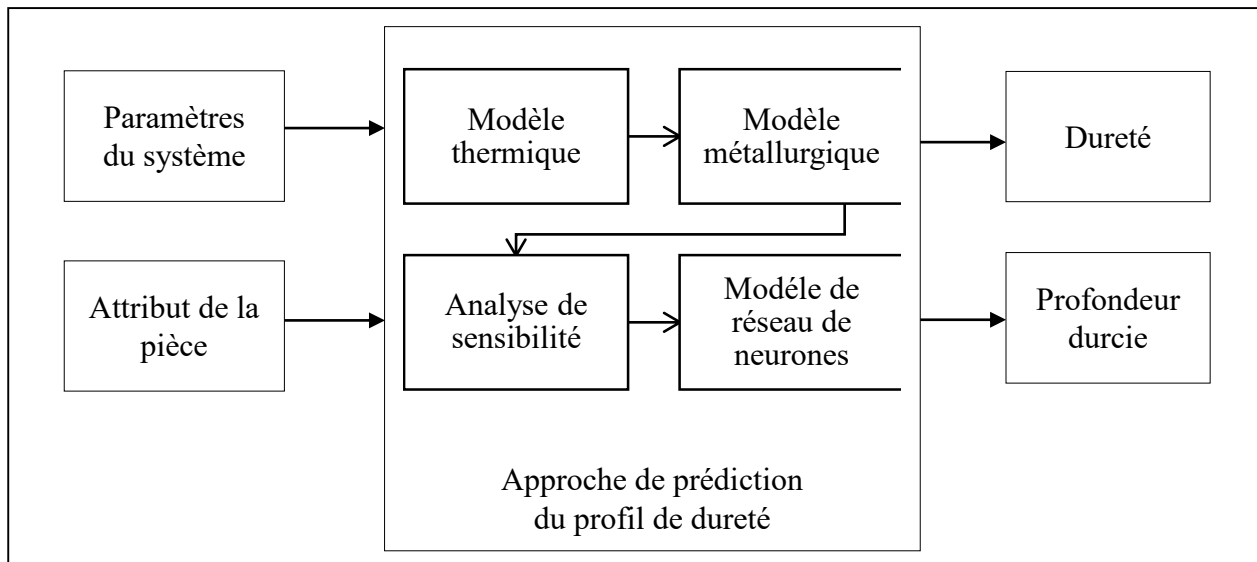


Figure 4 : Approche adoptée pour le développement du modèle de prédiction du profil de dureté

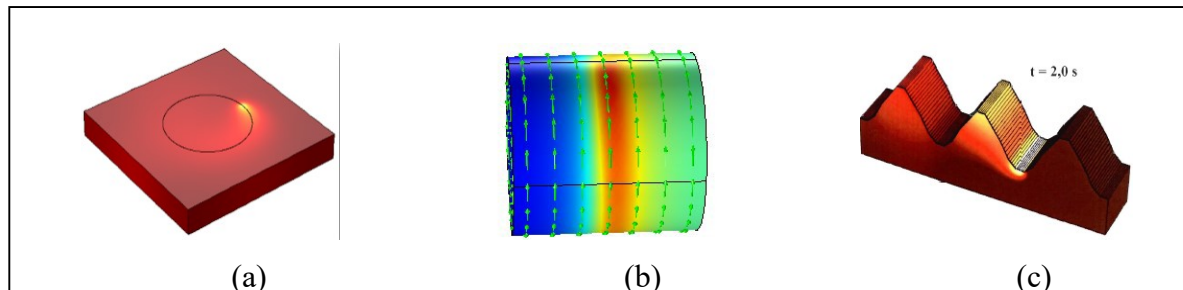


Figure 5 : Les approches de modélisation de traitement thermique par laser : (a) approche de Rosenthal, (b) approche implicite, (c) approche de secteur.

Ainsi et suite à l'implantation des modèles thermiques, les équations métallurgiques sont intégrées aux modèles sous forme d'algorithmes capables de reconstruire les profils de dureté à partir de matrices représentant les historiques des températures générées par les modèles thermiques. Les modèles sont par la suite validés en se basant sur des données issues d'expérimentations structurées utilisant l'ensemble des facteurs reconnus avoir une influence potentielle sur la qualité du traitement de surface.

Avant de passer au modèle prédictif global, une étude de sensibilité est réalisée à partir des modèles 3D validés expérimentalement. Cette étude permet d'évaluer et de comprendre

les effets de chaque paramètre sur le profil de dureté ainsi que les interactions possibles entre les différents paramètres. L'étude de sensibilité permet également d'identifier de façon structurée les paramètres les plus influents à utiliser comme variables dans le modèle prédictif global. La validation expérimentale des différents modèles est réalisée sur un système de traitement thermique au laser Nd : Yag de 3 kW et appliquée à l'acier AISI4340.

Cette combinaison alternée de modélisation, d'expérimentation et de simulation offre plusieurs avantages. Elle permet, d'une part de minimiser le coût d'expérimentation et, d'autre part, de favoriser la compréhension du comportement du procédé sous différentes conditions en vue d'une optimisation structurée et efficace afin de répondre aux besoins de l'industriel, qui vise une modélisation rapide permettant l'implantation d'une stratégie de contrôle en temps réel. Un modèle prédictif simple basé sur les réseaux de neurones est, dans ce contexte, un choix tout indiqué.

En plus de la présente introduction, ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier présente un modèle 3D pour prédire le profil de dureté dans le cas d'un cylindre en acier AISI 4340 traité thermiquement au laser et complété par une validation expérimentale et un modèle prédictif simplifié basé les réseaux de neurones. Le deuxième chapitre présente un modèle 3D pour la prédiction de profil de dureté dans le cas d'un arbre cannelé en acier AISI 4340 traité thermiquement par laser suivi d'une validation expérimentale. Le troisième présente une analyse structurée des effets des propriétés du matériau, des différents paramètres du système de traitement thermique au laser et des attributs géométriques de la pièce traitée sur la dureté surfacique, sur la profondeur durcie et sur le profil de dureté dans le cas d'un arbre cannelé en acier AISI 4340 traité thermiquement par laser. Le mémoire est complété par une conclusion générale et quelques suggestions concernant les suites à donner à ce projet.

CHAPITRE 1

PRÉDICTION DU PROFIL DE DURETÉ D'UN ARBRE CANNELÉ EN ACIER 4340 TRAITÉ THERMIQUEMENT PAR LASER EN UTILISANT LE MODÈLE 3D, VALIDATION EXPÉRIMENTALE ET RÉSEAUX DE NEURONES

1.1 RESUME EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Cet article présente une approche structurée pour le développement d'un modèle prédictif du profil de dureté dans le cas de pièces cylindriques traitées thermiquement au laser. Basée sur la méthode des éléments finis et sur les réseaux de neurones, l'approche proposée est construite de façon progressive en suivant les étapes suivantes : (i) l'examen de tous les facteurs pouvant avoir une influence sur la qualité du traitement et sur les attributs de la surface durcie à travers une investigation expérimentale structurée, (ii) l'étude des effets des paramètres du procédé et des propriétés du matériau sur le profil de dureté à travers des simulations intensives réalisées sur le modèle 3D du procédé et (iii) l'intégration de tous les paramètres ayant les effets les plus significatifs dans un modèle prédictif simplifié du profil de dureté en se basant sur les réseaux de neurones. La validation expérimentale des différents modèles a été réalisée sur un système de traitement au laser Nd : Yag de 3 kW et appliquée à un cylindre en acier AISI4340. Les résultats obtenus confirment non seulement la faisabilité de l'approche, mais démontre son efficacité en conduisant à un modèle de prédiction aussi bien précis que fiable.

Ce premier article, intitulé « Prediction of Hardness Profile of 4340 Steel Cylinder Heat Treated By Laser Using 3D Model, Experimental Validation and Artificial Neural Networks », a été élaboré par le professeur Abderrazak El Ouafi et moi-même. Il a été soumis au « Journal of Mechanical Science and Technology ». En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a consisté essentiellement dans la recherche bibliographique, le développement de la méthode, la modélisation, la simulation, et la rédaction de l'article. Le

professeur Abderrazak El Ouafi a fourni l'idée originale et a contribué au développement de la méthode ainsi qu'à la rédaction de l'article.

1.2 ABSTRACT

This paper presents a comprehensive approach developed to design an effective prediction model for hardness profile in laser surface transformation hardening process. Based on finite element method and artificial neural networks concept (ANN), the proposed approach is constructed progressively by (i) examining the laser hardening parameters and conditions known to have an influence on the hardened surface attributes through a structured experimental investigation, (ii) investigating the laser hardening parameters effects on the hardness profile through extensive 3D modeling and simulation efforts and (iii) integrating the hardening process parameters via neural network model for hardness profile prediction. The experimental validation conducted on AISI4340 steel using a commercial 3 kW Nd:Yag laser, confirm the feasibility and efficiency of the proposed approach leading to an accurately and reliable hardness profile prediction model.

Keywords: Artificial Neural Network, Element Method, Experimental Data, Hardness Profile, Heat Treatment, Laser Hardening

1.3 INTRODUCTION

Superficial heat treatment is an essential and complex process in manufacturing technology. The major objective of superficial hardening is to optimize the performance of operating mechanical components by modifying their physical, chemical and metallurgical properties.

The most common methods of heat treatment include flame, induction, carburizing and nitriding. The disadvantages of these methods, such as the complexity of equipment for some and problems with parameter control for others, lead to the use of high power lasers as a new heat treatment process. The first heat treatment of metals by laser took place in the early 1960s. In the following years, much research was performed on the superficial hardening of steel which allowed the use of the laser. At the outset, researchers were interested in under-

standing the influence of certain parameters (such as scanning speed, laser power, wavelength, beam diameter, etc.) on the temperature, hardness and depth of the treatment on flat geometries. Finite element models were created based on the Rosenthal equation of a moving heat source [1].

In another stage, some researchers became interested in the modeling of the temperature distribution on cylindrical piece during treatment, in order to predict the microstructure, hardening depth, hardness, and residual stresses. Rahul Patwa and Shin achieved a 3D finite element model. The model combines a transient digital three-dimensional solution (based on the modeling of Rozzi *et al.* [3–4]) for a rotary cylinder undergoing laser heating by translation of the beam with a kinetic model. In order to verify the results of the simulation, an experiment was performed. Both researches reach a depth of 0.54 mm with a hardness of 63 HRC on an AISI 5150 steel specimen with a laser (diode) power of 500 W and a rotational speed of 6 rev/min [2]. Skvarenina *et al.* also predicted experimentally and successfully reached a 2.5 mm hardening depth with a uniform hardness of 57 HRC on an AISI 1536 steel cylinder 60 mm in diameter, using a scanning speed of 2.9 mm/s, a laser (diode) power of 1220 W and a rotational speed of 1 rev/min [5]. Another thermal transient 3D model was developed by Leonardo Orazi *et al.* [6]. The model is based on the geometry of the ring spot and was validated by experimental tests. The advantage of the Leonardo model over other models is that it achieves very high speeds. For a rotational speed of 1140 RPM, a power of 1 kW, a scanning speed of 30 mm/min and a 30 mm diameter test piece of AISI 1040 steel, it finds a hardness of 690 HV. In general, a second laser pass generates a tempering of the material that is characterized by a drop in micro hardness. In the same context, the low processing speed creates a superposition of treatment which produces a non-homogeneous micro hardness.

The prediction of hardness by the finite element method has many advantages, namely minimizing costs and the experimentation time, but it remains a complex and specific tool depending on the case. In an industrial framework the objective is to develop rapid modeling that allows the implementation of a realtime control strategy. The regulation and selection of

optimal parameters is a challenge that must be addressed in a minimal amount of time. According to the literature, the most widely used methods of hardness predictions using laser heat treatment are linear multi-regression and artificial neural networks. Nouredine *et al.* found a mathematical model for the prediction of hardened depth based on the multi-regression method from a host of experimental tests on a 10 mm diameter cylinder. Using the Taguchi method, 19 experiments were planned with three factors at three levels. The various factors in the experiments are the scanning speed, the rotational speed and the laser power. With a power of 1700 W, a scanning speed of 4 mm/s and a rotary speed of 4000 RPM, a hardened depth of 1.9 mm was found [7]. A comparison between the two methods of hardness prediction on plates is performed by Ilyes Maamri *et al.* An experimental study was done with 16 training experiments and 9 validation experiments. The factors that are considered in this study are laser power, scanning speed, hardness, initial hardness and surface state. In this study, it is confirmed using validation tests that the neural network method leads to the most useful prediction [8].

The main objective of this work is first to design a thermal model based on the finite element method coupled with a hardness prediction algorithm relying on the metallurgical transformation kinetics. The second objective is to carry out a host of laser heating tests to validate the digital model. Finally, using the 3D model and artificial neural networks, we develop a predictive model of the hardness profile based on various operating parameters.

1.4 FINITE ELEMENT MODELING

In this study, the laser was modeled as a source of circular Gaussian heat. The laser moves along the shaft. The latter is mounted in a test stand that allows it to be turned at rather high rotational speeds. In general, non-linear mathematical models of heat transfer by conduction in a homogeneous and isotropic medium take the following form:

$$\rho.C_p \cdot \frac{dT}{dt} + \rho.C_p.u.\nabla T + \nabla \cdot (-k.\nabla T) = Q(x, y, z) \quad (1)$$

$Q(x, y, z)$ [W/m³], which is the volume density of the laser applied to the material, is given by:

$$Q(x, y, z) = I(x, y) \cdot (1 - R_c) \cdot A_c \cdot \exp(-A_c \cdot z) \quad (2)$$

where $I(x, y)$ W/m², which is the intensity of the laser, and is given by:

$$I(x, y) = \frac{Q_0}{S} \cdot f(x, y) \quad (3)$$

Here S is the surface of the beam in contact with the material and $f(x, y)$ is the Gaussian distribution of the beam, given by:

$$f(x, y) = e^{-\left(\frac{(x - (x_0 - V \cdot t))^2}{2 \cdot w^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2 \cdot w^2}\right)} \quad (4)$$

The effect of rotation of the piece is modeled by a transmission term in the heat transfer equation (Eq 1), so that it is not necessary to rotate the geometry explicitly. The boundary conditions were chosen as follows: the initial temperature of the system is supposed to be $T_0 = 293$ K; convection losses are taken into account and radiation losses are considered negligible as compared to the incident radiation; and in the rest of the surfaces, the adiabatic conditions are applied with $n \cdot (k \cdot \nabla T) = 0$. For the mesh, the tetrahedral shape was chosen and a convergence study of the mesh size was carried out in order to choose the optimal size.

1.5 METALLURGICAL MODELING

The metallurgical transformation process for the heat treatment of steel occurs over three major steps: the pearlite transformation to austenite (pearlite dissolution), the homogenization of the carbon in austenite, and the austenite transformation to martensitic [25]. By heating the material up to the temperature of eutectoid A_{c1} , colonies of pearlite in the microstructure are transformed into austenite. The distance between the pearlite plates, which allow colonies pearlite to be completely transformed into austenite, is given by the following formula:

$$I_p^2 = 2.D_0.c_d.\tau_h.e^{\left(-\frac{Q_a}{R_s.T_p}\right)} \quad (5)$$

where D_0 is the diffusion constant, Q_a is the activation energy, R the gas constant, T_p is the peak temperature, and the two constants c_d and τ_h are given by equations 6 and 7:

$$c_d = 3.\sqrt{\frac{R_s.T_p}{Q_a}} \quad (6)$$

$$\tau_h = \frac{(1-R_c).P}{2.\pi.K.e.V.(T_p - T_0)} \quad (7)$$

Here K the thermal conductivity, V is the scanning speed, T_0 is the initial temperature and R is the reflection coefficient. The homogenization mechanism is simple: around a ferrite grain and a cementite grain, an austenite germ can be created. This germ is formed by eutectoid transformation with a chemical composition of 0.8% C. As the temperature rises it undergoes a systematic change in its composition. Rapid cooling of the austenite, which is formed only within a thin layer during laser hardening due to the self-sealing of the material when the laser beam is moved away, makes it difficult for carbon to diffuse outside its lattice. When the carbon is trapped in the network and cooled, the face-centered cubic crystal structure of austenite is transformed into a hybrid quadratic structure, called martensitic [5]. The martensitic volume fraction, f , which is formed on a period T , is given by EQ 8:

$$f = f_m - (f_m - f_i)e^{\left[-\frac{12.f_i^{2/3}}{g_s.\sqrt{\pi}} \ln\left(\frac{C_e}{2.C_c}\right).\frac{l_p^2}{\sqrt{2}}\right]} \quad (8)$$

where $f_i = C/0.8$ as the initial volume fraction of pearlite and f_m is the volume fraction of martensite, given by the following relationship:

$$\begin{cases} 0 & \text{if } T_p < A_1 \\ f_i + (1-f_i).\frac{T_p - A_1}{A_{c3} - A_1} & \text{if } A_1 < T_p < A_{c3} \\ 1 & \text{if } T_p < A_1 \end{cases} \quad (9)$$

The hardness of the material is calculated as follows:

$$H = f.H_m + (1 - f).H_{f+p} \quad (10)$$

were H_m and H_{f+p} are calculated following Maynier's equations and taking into account the initial chemical composition [10–11].

1.6 SIMULATION RESULTS

This study investigates the machine sensitivity parameters of laser heat treatment of an AISI 4340 steel shaft. The AISI 4340 steel is very common in the aerospace and automotive industries in the manufacture of propeller shafts, connecting rods, gear shafts and other parts, and automobiles due to its high tensile strength (see Table1).

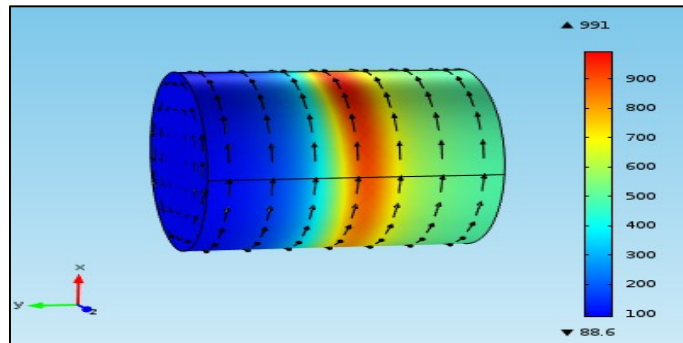


Figure 5 : Simulation results-Temperature distribution

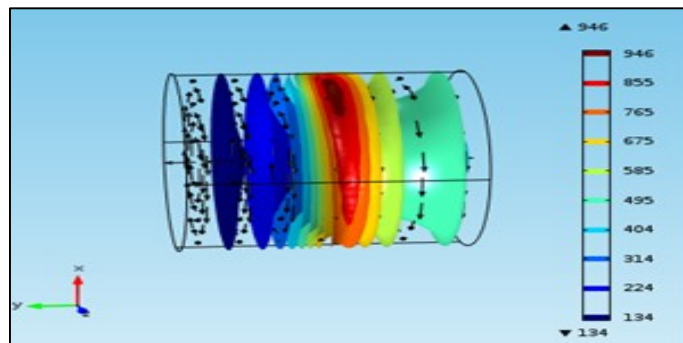


Figure 6: Simulation results-Heat Flux distribution

TABLE 1: Chemical composition of 4340 steel.

Elements	Content (wt %)
C	0.38-0.43
Cr	0.70-0.90
Mn	0.60-0.80
Mo	0.20-0.30
Ni	1.65-2.00
P	0.040max
Si	0.20-0.35
S	0.040max
Fe	Balance

The interesting conclusion drawn from figures 5 and 6 is that the temperature does not increase abruptly at a given point, as in the case of the treatment of the plates, but rather gradually increases as the beam gets closer to the point. This is due to the rotation effect

TABLE 2: Material properties

Property	Symbol	Unit	Value
Reflexion coefficient	Rc		0.6
Steel absorptivity	Ac	m ⁻¹	800
Eutectoid temperature	Ac1	K	996
Austenitization temperature	Ac3	K	1063.15
Austenite grain size (assumed)	g	μm	
Activation energy of carbon diffusion in ferrite	Q	KJ/mol	10
Pre-exponential for diffusion of carbon	D0	m ² /s	80
Gas constant	R	J/mol. K	6.10 ⁻⁵
Steel carbon content	C		0,34 %
Austenite carbon content	Ce		0,8 %
Ferrite carbon content	Cf		0.01%
Critical value of carbon content	Cc		0.05%
Volume fraction of pearlite colonies	fi		0.5375

As demonstrated in figure 7, an increase in the power causes an increase in the maximum temperature reached. The power directly affects the rate of heating and cooling and subsequently affects the microstructure obtained. The speed of heating and cooling increases proportionally according to the scanning speed. The influence of rotational speed becomes negligible at and above 4000 r/min. With a rotational speed of 1000 r/min, a

scanning speed of 5 mm/s and a power of 1550 W, the temperature reaches 1800 °C (see figure 8).

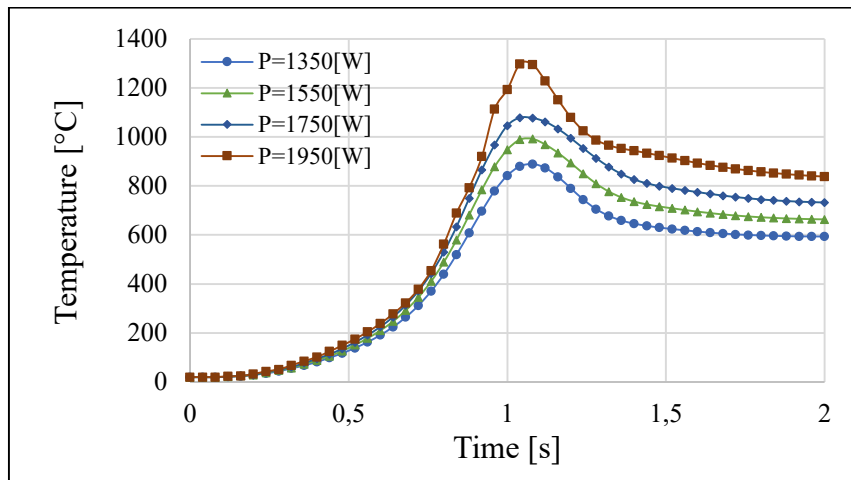


Figure 7: The influence of laser power on the temperature and time of treatment ($W=4000$ [RPM] and $V=5$ [m/s]).

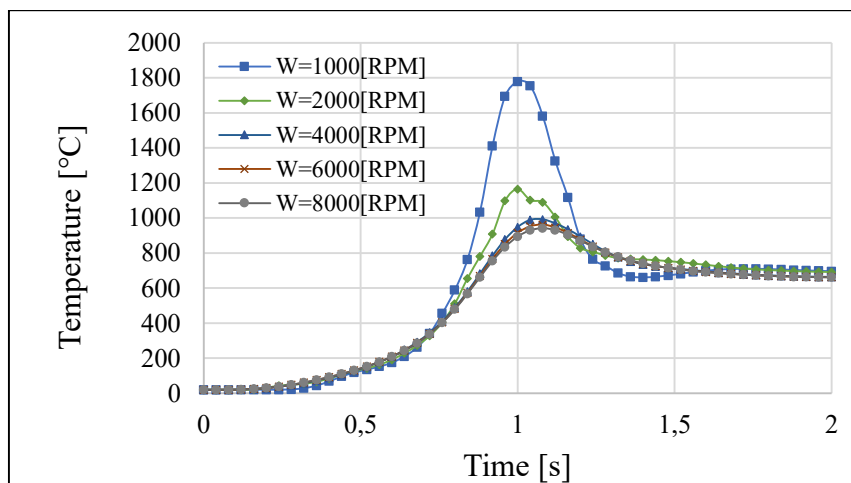


Figure 8: The influence of rotational speed on the temperature and time of treatment ($P=1550$ [W] and $V=5$ [m/s]).

It is clear from figure 9 that an increase in scanning speed decreases treatment, both in terms of time and temperature. With a scanning speed of 2 mm/s, the temperature reached is greater than the melting temperature

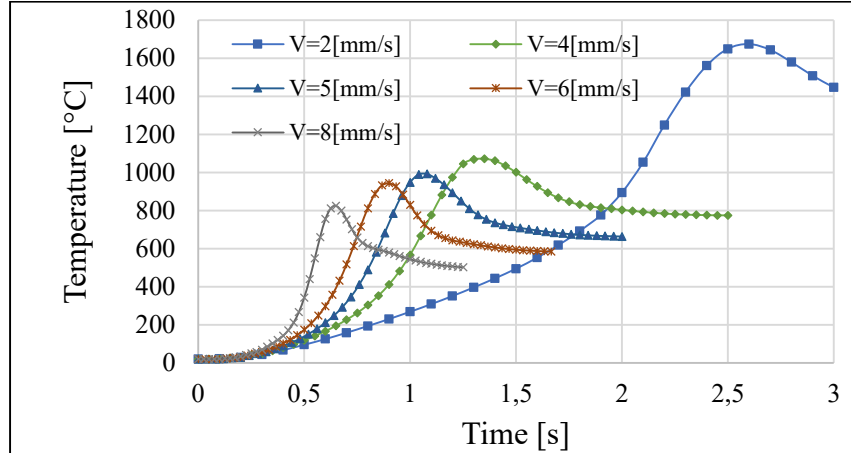


Figure 9: The influence of the scanning speed on the temperature and time of treatment ($P=1550[W]$ and $W=4000[RPM]$)

1.7 EXPERIMENTAL VALIDATION

The experiments were done with an AISI 4340 steel cylinder 10 mm in diameter. The specimen is mounted on a test stand that could reach rotation speeds up to 10,000 rev/min. The laser used is Nd type: YAG. The laser head is mounted on a Fanuc robot with six degrees of freedom. Figure 10 shows the experimental setup. The specimens are treated by hardening and tempering to ensure a core hardness of 35 HRC. The micro hardness is measured from a Clemex device. Four experiments were conducted with a random choice of parameters to validate the finite element model. An algorithm based metallurgical formulations coupled with Matlab can process the simulation results of the tests on COMSOL.

Practical experiments are performed (Table 3) with a confidence interval of 95%. Figure 11 and 12 show the relative deviations between the practical measures and the simulation results that are acceptable for 3D model validation. For tests 1 and 3, the relative error varies between 3.5% and 11%. The relative errors for tests 2 and 4 are under 1%. In the second part of this study the model is used instead of practical testing, as a companion test

that aims to elucidate the effects of input parameters with ANOVA. The simulation results are also used in the construction of artificial neural networks

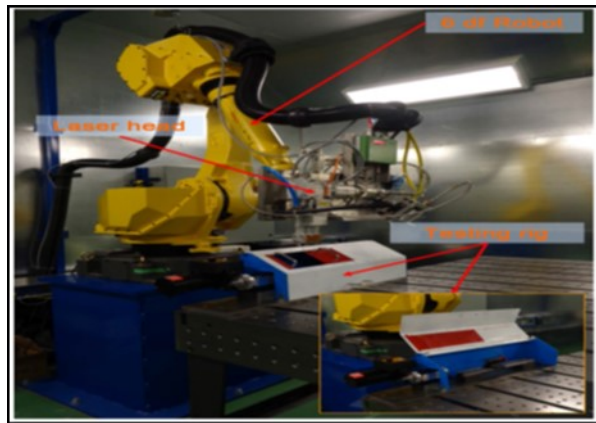


Figure 10: Experimental setup

TABLE 3: Validation Test

Test	P (W)	V (mm/s)	W (RPM)
1	1750	5	4000
2	1550	5	4000
3	1300	4	2000
4	1500	8	4000

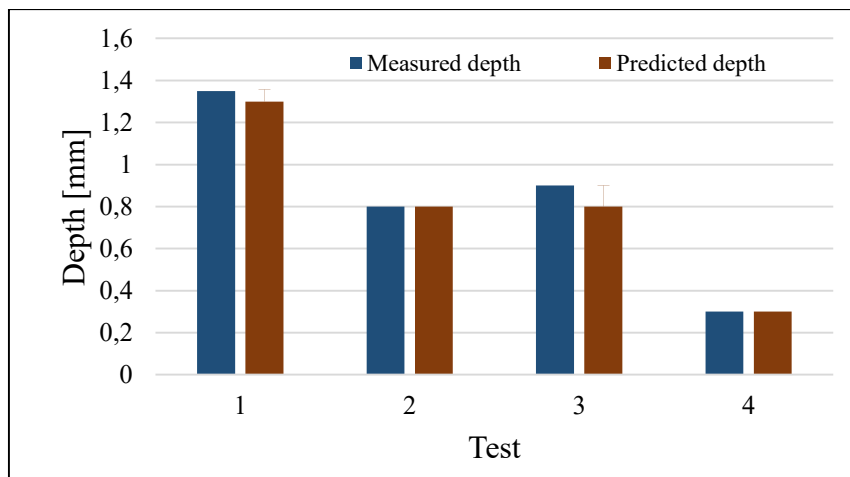


Figure 11: Experimental validation of the hardened depth

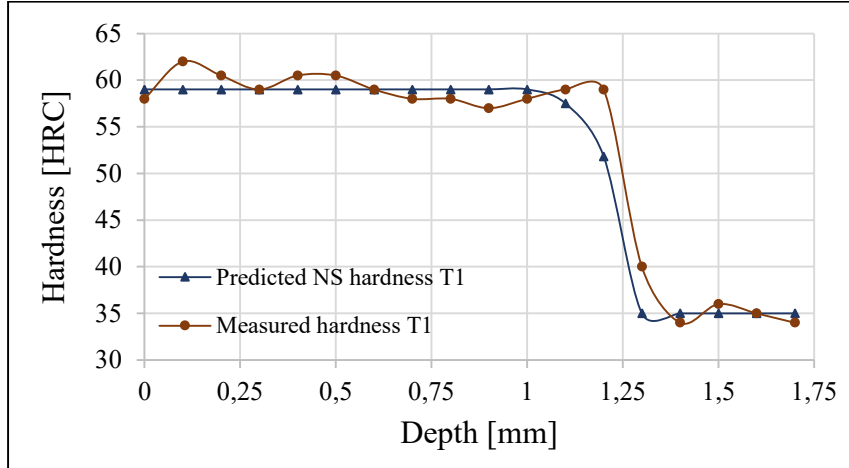


Figure 12: Typical hardness curve—Tests 1

1.8 STATISTICAL ANALYSIS

The objective of this part is to identify the influence of various system parameters on the hardened depth. This is carried out with the help of experiment designs, consisting in producing a series of N experiments and determining the value of the response function for these N configurations. So, in this case, the selected solution is the profile of the hardened depth shown by the three characteristic points $\{H_1, D_1, D_2\}$. The experiments are carried out using a 3D model with COMSOL software (see Figures 5 and 6). The factors to be examined in this study are power, rotary speed and scanning speed (Table 4). The analysis of the variance (ANOVA) is a basic tool in determining the significance of a particular effect or a mathematical model. The principle of the analysis of variance is based on calculating the total difference between the results of the results of modeled experiments and the average of those measurements.

ANOVA is a computational technique which is used to estimate the relative significance of each process parameter in terms of percent contribution to the overall response. The parameters with higher percent contributions are ranked higher in terms of importance in the experiment, and also have significant effects in controlling the overall

response [13]. Among several existing plans, the Taguchi orthogonal plan minimizes the effect of aliases and measures error with minimum testing. In this context, an orthogonal plan L27 of 3 factors to 3 levels was chosen (Table.5) [12].

Table 4: Factors representation

Factor	Symbol	Units
Power	P	W
Scanning speed	V	mm/s
Speed of rotation	W	RPM

TABLE 5: Experimental Test (L27 orthogonal)

Factor	Levels		
P	1300	1500	2000
V	4	6	4000
W	1000	2000	6000

The results of the tests presented Table 6 show that in this case the factors {P, V} and the interaction {PV} have a P-value less than 0.005, which means that there are 0.05 in 100 chances that the true value of the coefficient {P, V, W, PV} will be zero. This confirms the significance of the power, the scanning speed, the rotational speed, and the interaction between the power and the scanning speeds in the model.

Table 6: Variance analysis case of depth (D₂)

Source	DF	Sum Squares	Mean Square	F-Value	P-Value	C (%)
P	2	133,725	0.5933	584.65	0.000	18.91
V	2	477,970	0.2189	215.73	0.000	67.60
W	2	0.05899	0.0117	11.53	0.004	0.83
P.V	4	0.88339	0.2208	217.62	0.000	12.49
P.W	4	0.00170	0.0004	0.42	0.791	0.02
V.W	4	0.00166	0.0004	0.41	0.742	0.02
Error	8	0.00812	0.0010			0.11
Total	26	707,081				100

The influence of the other terms is not significant in controlling the overall response [13]. The results of Figure 13 confirm the preliminary simulation results, showing a remarkable influence of scanning speed and power. On the other hand, the influence of the rotation speed is negligible in relation to the other factors. The contribution of power to the hardened depth is 18.91%, and the contribution of the scanning speed is about 67.60%.

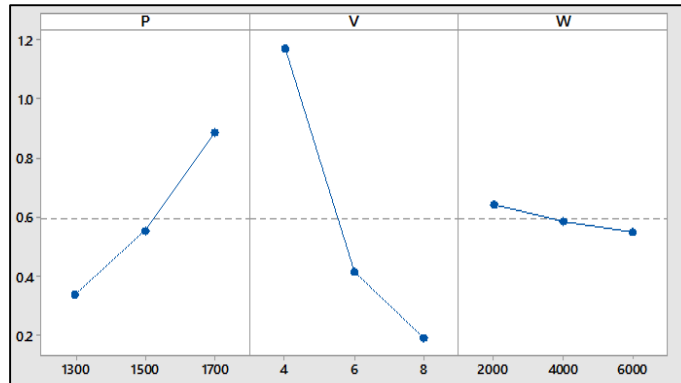


Figure 13: Effect of the parameters on the depth (D_2)

1.9 ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

The objective of this section is to create a model of artificial neural networks capable of predicting the hardness and the hardened depth. The curve describing the hardness profile is divided into three zones. The first is the hardened zone, consisting of 100% martensite. The second is the transition zone, consisting of ferrite, pearlite and martensite. The third zone is the untreated area. For this reason, we define the four points $\{H1, H2, D1, D2\}$: the first two sets are used to define the hardness and the others to define the depth (see Figure 14). The artificial neural network is a very powerful model in terms of its precision in prediction, inspired by the biological neuron. A network consists of several layers. The first layer is for the inputs and the final layer is for the outputs [14–17]. The number of intermediate layers depends on the complexity of the problem to be dealt with. The inputs to the system are the scanning speed, the rotation speed and the laser power, but the outputs are the limits of the hardness curve, $H1, D1, D2$. The design used in the ANOVA study is chosen mainly to

determine the interactions of different factors. In addition, it does not present a rich database for a neural network. For this another orthogonal design was chosen in order to have given a more complete database. The selected plan is the 125 Taguchi plan (table.7). It consists of three factors on five levels.

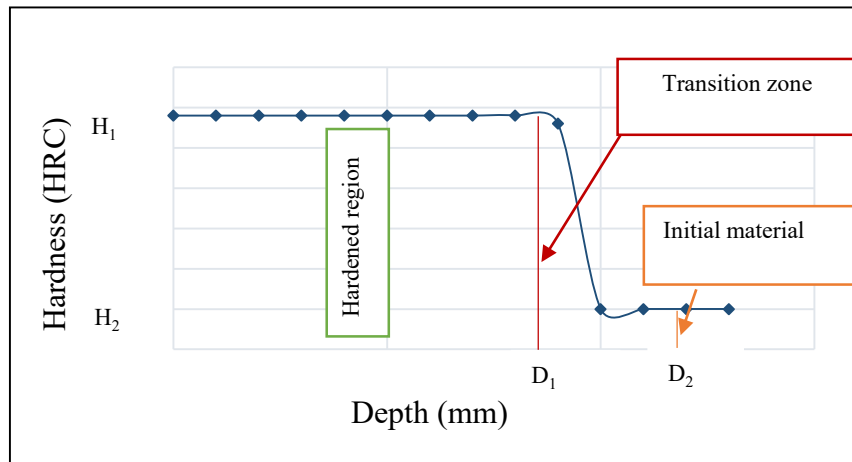


Figure 14: Typical basic hardness curve

A neural network model of 3 inputs and 2 two outputs was established. The three input parameters are P, V and W. The output parameters are the hardened depths D_1 and D_2 . A single hidden layer of 10 neurons was used. The sigmoid function is used as the activation function. Furthermore, the value of the coefficient of determination, $R^2 = 99.58\%$, is good, which indicates that the model is relatively well adjusted. Therefore, there is a good correlation between the measured values and the calculated ones (figure 15). Another neural network model of three inputs and one output was also established. The three input parameters are P, V and W. The output parameter is the hardness depth, H_1 (figure 16).

Table 7: Factors and study field

Factor	Levels				
P	1200	1400	1600	1800	2000
V	4	5	6	7	8
W	1000	2000	3000	4000	5000

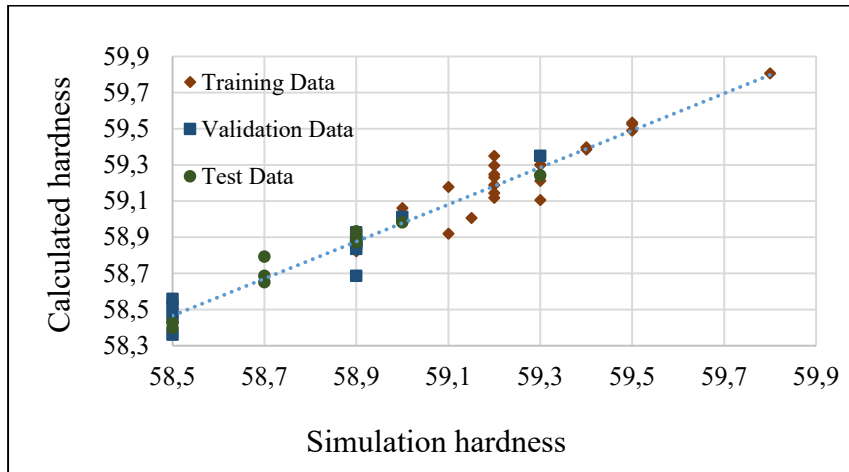


Figure 15: Scatter plots of simulation and prediction of $\{D_1, D_2\}$

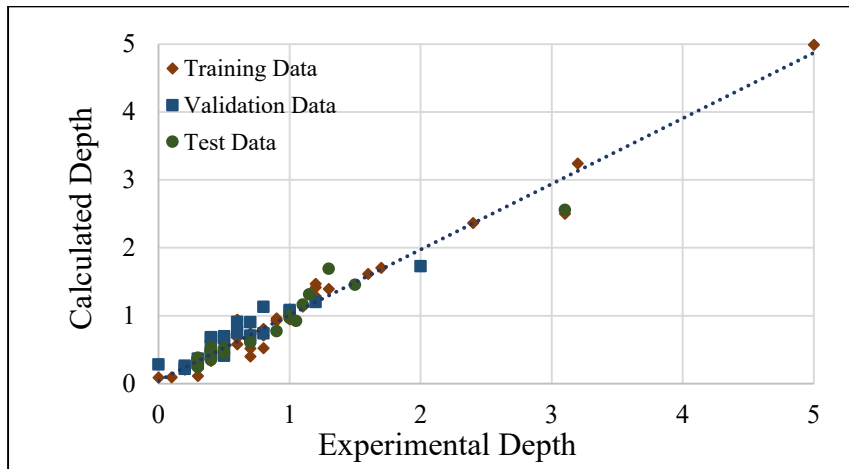


Figure 16: Scatter plots of simulation and prediction of H_1

An orthogonal matrix L9, based on the Taguchi method, was used in the validation experiments (table.8) [12]. The validation matrix is injected into the same neuron network programs previously used. The results found in the validation are satisfactory and show that the model is reliable in predicting the hardness based on other input parameter. Table 9 shows that the values of the coefficients of determination of the validation tests of the points $\{D_1, D_2\}$ and $\{H_1\}$ are 94,104 and 95,427, respectively. This implies a very good capacity for prediction.

Table 8: Factors and validation field

Factor	Levels		
P	1300	1400	1600
V	4	5	6
W	3000	4000	5000

An orthogonal matrix L9, based on the Taguchi method, was used in the validation experiments (table.8) [12]. The validation matrix is injected into the same neuron network programs previously used. The results found in the validation are satisfactory and show that the model is reliable in predicting the hardness based on other input parameter. Table 9 shows that the values of the coefficients of determination of the validation tests of the points $\{D_1, D_2\}$ and $\{H_1\}$ are 94,104 and 95,427, respectively. This implies a very good capacity for prediction.

Table 9: Coefficient of determination

	R_{training}	R_{validation}	R_{test}	R_{total}
Depth	0.99583	0.94104	0.95329	0.97701
Hardness	0.99313	0.95427	0.9732	0.97909

Two practical tests were planned to validate the results of the neural networks (table 10). With a power of 1500 W, a scanning speed of 4 mm/s, and a rotary speed of 4000 RPM, the relative errors is 11% in prediction of the D_1 point, and 0% in prediction of the D_2 point (figure 17). As a conclusion the method of neural networks is very reliable in terms of prediction, and enables manufacturers to create a rich and an accurate database.

Table 10: Validation test of the neuronal network

Test	P	V	W
1	1300	5	4000
2	1500	4	4000

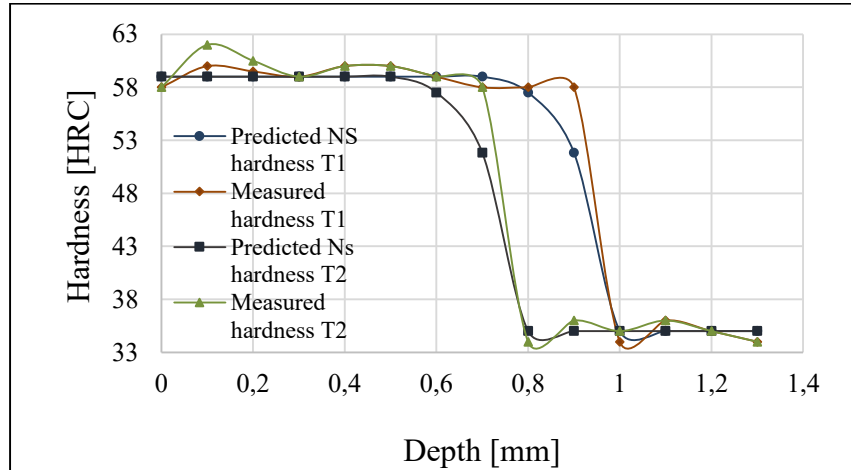


Figure 17: Validation results for the ANN prediction model

1.10 CONCLUSION

In this study, a comprehensive approach developed to design an effective prediction model for hardness profile of AISI 4340 steel heat treated by laser is presented. Several laser hardening parameters and conditions were analyzed and their correlation with multiple performance characteristics of hardened surface was investigated using a structured experimental investigations and exhaustive 3D numerical simulations under consistent practical process conditions. After identifying the hardening parameters and conditions that provide the best information about the laser heating and the surface hardening transformation processes, an ANN based modelling approach was proposed to build an accurate and consistent hardness profile prediction model. The resulting model demonstrates that the ANN modelling approach can be used to achieve an accurate predicting model. Globally, the performance of the hardness profile prediction model shows significant improvement as compared to conventional methods such as multiple regression analysis. With a global maximum relative error less than 11% under various conditions, the prediction model can be considered efficient and have led to conclusive results, due to the complexity of the heat treatment process.

1.11 REFERENCES

- [1] Santhanakrishnan,S., & Kovacevic,R. (2012). Hardness prediction in multi-pass direct diode laser heat treatment by on-line surface temperature monitoring. *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (11), 2261–2271.
- [2] Patwa,R., & Shin,Y.C. (2007). Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2), 307–320.
- [3] Rozzi,J.C., Pfefferkorn,F.E., Incropera,F.P., & Shin,Y.C. (1998). Transient thermal response of a rotating cylindrical silicon nitride workpiece subjected to a translating laser heat source, part I: comparison of surface temperature measurements with theoretical results. *Journal of heat transfer*, 120 (4), 899–906.
- [4] Rozzi,J.C., Pfefferkorn,F.E., Incropera,F.P., & Shin,Y.C. (2000). Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: I. Comparison of predictions with measured surface temperature histories. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (8), 1409–1424.
- [5] Skvarenina,S., & Shin,Y.C. (2006). Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser. *Surface and Coatings Technology*, 201 (6), 2256–2269..
- [6] Orazi,L., Liverani,E., Ascari,A., Fortunato,A., & Tomesani,L. (2014). Laser surface hardening of large cylindrical components utilizing ring spot geometry. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 63 (1), 233–236.
- [7] Barka,N., & El Ouafi,A. (2015). Effects of Laser Hardening Process Parameters on Case Depth of 4340 Steel Cylindrical Specimen—A Statistical Analysis. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 5 (03), 124.
- [8] Maamri,I., El Ouafi,A., & Barka,N. (2014) Prediction of 4340 Steel Hardness Profile Heat-treated by Laser Using Artificial Neural Networks and Multi Regression approaches. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 4' (6) 14–22.
- [9] Ashby,M.F., & Easterling,K.E. (1984). The transformation hardening of steel surfaces by laser beams—I. Hypo-eutectoid steels. *Acta Metallurgica*, 32 (11), 1935–1948.
- [10] Maynier,P., Dollet,J., & Bastien,P. (1978). Prediction of microstructure via empirical formulas based on CCT diagrams. *Metallurgical Society AIME*,, 163–178..
- [11] Maynier,P., Jungmann,B., & Dollet,J. (1977). Creusot—Loire System for the Prediction of the Mechanical Properties of Low Alloy Steel Products. *Hardenability Concepts with Applications to Steel*, 518–545.

- [12] Mason,R.L., Gunst,R. F., & Hess,J. L. (2003). *Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science* (Vol. 474). John Wiley & Sons.
- [13] Acherjee,B., Misra,D., Bose,D., & Venkadeshwaran,K. (2009). Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology. *Optics & Laser Technology*, 41 (8), 956–967.
- [14] Dhara,S.K., Kuar,A.S., & Mitra,S. (2008). An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (1–2), 39–46.
- [15] Buffa,G., Fratini,L., & Micari,F. (2012). Mechanical and microstructural properties prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 14 (3), 289–296.

CHAPITRE 2

PRÉDICTION DE PROFIL DE DURETÉ D'UN ARBRE CANNELÉ EN ACIER 4340 TRAITÉ THERMIQUEMENT PAR LASER — MODÈLE 3D ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE

2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE

Le traitement surfacique par laser devient l'un des procédés les plus efficaces utilisés pour améliorer la résistance à l'usure et à la fatigue des pièces mécaniques. Dans ce procédé, les propriétés physico-chimiques des matériaux et des paramètres du système de chauffage ont des effets significatifs sur les caractéristiques de la surface durcie. Pour exploiter convenablement les avantages présentés par le traitement de surface au laser, il est nécessaire d'élaborer une stratégie globale afin de contrôler les variables du processus en vue de produire les attributs de la surface durcie souhaités sans être obligé d'utiliser les procédures traditionnelles long et coûteux processus essai-erreur.

L'article présente une modélisation prédictive du profil de dureté pour les arbres cannelés à l'aide d'un modèle 3D et d'une validation expérimentale. L'approche proposée est basée sur des simulations thermiques et métallurgiques intensives et sur une étude expérimentale et une analyse statistique structurées pour construire le modèle de prédiction. La simulation du procédé de traitement est effectuée en utilisant des modèles 3D de simulation par éléments finis. Les modèles sont utilisés pour estimer la répartition de la température et les attributs du profil de dureté pour les différents paramètres de traitement, telles que la puissance du laser, la vitesse de rotation et la vitesse de balayage. Les expérimentations ont été réalisées sur un système laser 3 kW Nd : Yag et appliquées à un arbre cannelé en acier AISI 4340. Les résultats obtenus révèlent que le modèle prédictif résultant est capable de fournir non seulement une prédiction cohérente et précise de la

répartition de la température et des caractéristiques du profil de dureté, mais aussi une analyse quantitative complète des effets des paramètres de procédés. Les résultats de la modélisation montrent également une grande concordance entre les prédictions et les mesurées pour différentes conditions de traitement.

Le deuxième article, intitulé « Prediction Of Hardness Profile Of 4340 Steel Spline Shaft Heat Treated By Laser Using 3d Model And Experimental Validation », a été élaboré par le professeur Abderrazak El Ouafi et moi-même. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2016 au « Journal of Materials Science and Chemical Engineering, Vol. 4, pp. 9-19, 2016 ». En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail consiste dans l'essentiel de la recherche bibliographique, le développement de la méthode, la modélisation, la simulation et la rédaction de l'article. Le professeur Abderrazak El Ouafi a fourni l'idée originale et a contribué au développement de la méthode ainsi qu'à la rédaction de l'article.

2.2 ABSTRACT

Laser surface transformation hardening becomes one of the most effective processes used to improve wear and fatigue resistance of mechanical parts. In this process, the material physicochemical properties and the heating system parameters have significant effects on the characteristics of the hardened surface. To appropriately exploit the benefits presented by the Laser surface hardening, it is necessary to develop a comprehensive strategy to control the process variables in order to produce desired hardened surface attributes without being forced to use the traditional and fastidious trial and error procedures. The paper presents a study of hardness profile predictive modeling and experimental validation for spline shafts using a 3D model. The proposed approach is based on thermal and metallurgical simulations, experimental investigations and statistical analysis to build the prediction model. The simulation of the hardening process is carried out using 3D finite element model on commercial software. The model is used to estimate the temperature distribution and the hardness profile attributes for various hardening parameters, such as laser power, shaft rotation speed and scanning speed. The experimental calibration and validation of the 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 parameters and conditions but also a comprehensive and quantitative analysis of process parameters effects. The modelling results show great concordance between predicted and measured values for the dimensions of hardened.

Keywords: Heat Treatment, Laser Surface Transformation Hardening, Finite Element Method, Hardness Profile Prediction, AISI 4340, Nd:Yag Laser System, ANOVA

2.3 INTRODUCTION

Surface transformation hardening processes are designed to improve wear and fatigue resistance by hardening the superficial critical areas using brief and localized heat gains. Among these processes, laser surface transformation hardening process is well-known by its capacity in terms of power flux. Physically, the laser surface hardening mechanism is similar to a conventional heat treatment: Application of the laser beam rapidly raises the surface temperature (more than to 1000K/s), resulting in a thin layer that is converted into austenite. Subsequent removal of this energy results in self-quenching caused by the conduction of heat into the relatively cool bulk of the material. This produces a rapidly cooled surface layer and causes a transformation of the austenite into martensite [1–5].

Laser surface transformation hardening offers several advantages: localized treated areas, a relatively small heat affected zone, limited metallurgical changes, reduced residual stresses and deformations, very fast thermal cycling and autogenous quenching, and appropriate process for automation and complex production lines when using robots. Despite all its advantages, applications of laser surface treatments represent a very small percentage of industrial plants. Laser surface hardening is still in its infancy, with only a few years of development and it is virtually only developed in the aerospace and automotive industries. This work is a continuing effort to develop power laser applications for surface treatments.

The modeling of laser heat treatment went through several stages. In the first, researchers were interested in statistical modeling to understand the influence of certain parameters and develop empirical formulas [6–7-8]. Then, other researchers became interested in analytical modeling based on the general equation of heat conduction proposed by Fourier [9–11]. During the 90s, advancements in IT brought more powerful computational tools to researchers in all fields. Several numerical modeling software made their appearances and greatly accelerated technical developments. These improvements allowed more complex problems to be modeled and solved. According to the literature, there are three methods to model a mobile heat source. The first method is based on the Rosenthal equation of a mobile

heat source [12–13]. The second is to move the source implicitly based on the transport term in the heat equation [14]. The last one is the method of Area Sector Approach. The geometry of the heat treated sample is the main factor in selecting the method of modeling [15–16]. The second method is efficient only if the geometry is not intricate, and the third is applicable when the movement is simple. The first method is effectual with complex geometries and complex movement, but the challenge is finding the ideal trajectories of the heat source.

To treat revolutionary geometries, the sample must be rotated, and the laser beam must be in a translational movement as illustrated in figure 18. In accordance with the literature, Rahul Patwa and Shin achieved a 3D finite element model [19]. The model combines a transient digital three dimensional solution (based on the modeling of Rozzi *et al.* [17–18]) for a rotary cylinder undergoing laser heating by beam translation with a kinetic model. In order to verify the results of the simulation, an experiment was performed. Both researchers reached a depth of 0.54 mm with a hardness of 63 HRC on an AISI 5150 steel sample with a laser (diode) power of 500 W and a rotational speed of 6 RPM [19]. Skvarenina *et al.*, were capable of predicting and experimentally validating a 2.5 mm hardening depth with a uniform hardness of 57 HRC on an AISI 1536 steel cylinder 60 mm in diameter, using a scanning speed of 2.9 mm/s, a diode laser power of 1220 W and a rotation speed of 1 RPM [20]. Another thermal transient 3D model is developed by Leonardo Orazi *et al.* [21]. The model is based on the geometry of the ring spot and was validated by experimental tests. The advantage of the Leonardo model over other models is that it achieves very high speeds. For a rotational speed of 1140 RPM, a power of 1 kW, a scanning speed of 30 mm/min, and a test piece of AISI 1040 steel 30 mm in diameter, he found a hardness of 690 HV. In general, a second laser pass generates a tempering of the material that is characterized by a drop in micro hardness. In the same context, low processing speeds create a superposition of treatment which gives a non-homogeneous micro hardness.

The literature review reveals the small number of researches dealing with revolutionarily complex sample processing. The majority of the researchers focused mainly on the study of this phenomenon on gears. Benedict and Eskildsen tested an approach to treat

small gears, which proved very promising [22]. In fact, this method consisted of the laser beam scanning from one gear tooth tip to another through variation of the angle of incidence, power, and interaction time (forward speed). In 2003, Zhang *et al.* used this approach to treat sprockets with 98 mm outside diameters and 23 teeth [23]. They were installed on a mounting allowing the wheel to be moved laterally and be brought into rotation. The results were very conclusive: the cured depth of the flanks was of a relatively uniform thickness and was not a stressed fusion surface. However, no process modeling was presented. Pretorius and Vollertsen have modeled a form of laser heat treatment on a toothed wheel, where the heat treatment was applied only in the tooth root [24]. The 3D digital model was developed using the SYSWELD package and consisted of modeling the thermal flow, metallurgical transformations, and geometrical. Clearly, the modeling of heat treatment of the revolutionary complex geometry is limited. Among such geometries are spline shafts. Until now, there is no work, neither experimental nor modeling, which presents the laser heat treatment of the spline shaft. Due to its ability to transmit large torques and ease machining, spline shafts have become the essential tools for power transmission. In this work, a method for the prediction of hardened depth using laser heat treatment of a spline shaft with a high speed of revolution is presented.

The main objective of this work is to develop an integrated approach for hardness profile predictive modeling and experimental validation for spline shafts using a 3D model. The numerical simulation of the hardening process is carried out by 3D finite element model using Comsol Multiphysics software. The model is used to estimate the temperature distribution and the hardness profile attributes for various hardening parameters and material properties. Applied on AISI 4340 steel spline shaft, the experimental calibration and validation of the model is performed on a commercial 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 parameters and conditions but also a comprehensive analysis of process parameters effects. The results show great concordance between predicted and measured values for the dimensions of hardened.

2.4 FINITE ELEMENT MODELLING

In this study, the laser was modeled as a source of circular Gaussian heat. The laser moves along the spline shaft. The latter is mounted in a test stand that allows it to be turned at rather high rotational speeds.

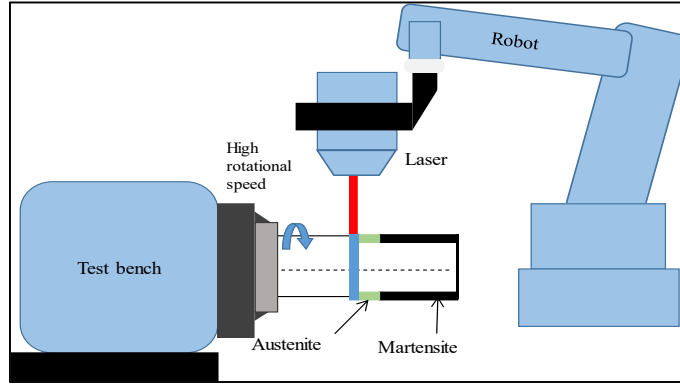


Figure 18: Basic Configuration of the laser hardening a cylindrical piece.

In general, non-linear mathematical models of heat transfer by conduction in a homogeneous and isotropic medium take the following form:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \nabla T + \nabla(-k \nabla T) = Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

The volume density of the laser $Q(x, y, z, t)$ applied to the material, is given by:

$$Q(x, y, z, t) = \frac{Q_0 A_c (1 - R_c)}{2\pi w^2} f(x, y, z, t) \quad (2)$$

Here Q_0 is the power of laser, A_c is the coefficient of absorption, R_c is the coefficient of reflection, W is the radius of the laser beam, and $f(x, y, z, t)$ is the function that describes the shape and the path of the beam, given by:

$$f(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{(a_{x,t}^2 + b_{y,z,t}^2)}{(2w^2)}\right) \exp(-A_c c_{y,z,t}) \quad (3)$$

The challenge in modeling the laser heat treatment of splines is that the geometry is complex and the heat source must follow the teeth and the flanks of groove. For this, the solution was to find a mobile frame of vector space at each time t , of which a , b and c are given by:

$$\begin{aligned} a_{x,t} &= x + x_1 \left(1 - \cos\left(\left(\frac{2\pi t}{t_f} - \varphi\right)\right)\right) \\ b_{y,z,t} &= z_0 \cos(\omega t) + y_0 \sin(\omega t) \\ c_{y,z,t} &= -z_0 \sin(\omega t) + y_0 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

where x_1 is the length travelled by the laser beam, t_f is the duration of treatment, ω is the rotational speed in rad/s, y_0 and z_0 are the instantaneous positions along y and z , respectively, and are given by Equation 5:

$$\begin{aligned} y_0 &= y - R \sin(\omega t) \\ z_0 &= z - R \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (5)$$

The beam should treat tooth and flank, which requires clarified beam position either on the tooth or the flank.

$$R = R_d - e H(t) \quad (6)$$

Here R_d is the outer diameter of spline shaft, e is the depth of the groove and $H(t)$ is the position function of the laser beam:

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \in A \\ 0 & \text{if } t \notin A \end{cases} \quad (7)$$

With A is a function dependent on the number of teeth.

2.5 METALLURGICAL MODELING

The metallurgical transformation process for the heat treatment of steel occurs over three major steps: the pearlite transformation to austenite (pearlite dissolution), the homogenization of the carbon in austenite, and the austenite transformation to martensitic [25]. By heating the material up to the temperature of eutectoid Ac1, colonies of pearlite in the microstructure are transformed into austenite. The distance between the pearlite plates, which allow colonies pearlite to be completely transformed into austenite, is given by the following formula:

$$I_p^2 = 2D_0 c_d \tau_h e^{\left(-\frac{Q_a}{R T_p}\right)} \quad (8)$$

Where D_0 is the diffusion constant, Q_a is the activation energy, R the gas constant, T_p is the temperature of spades, and the two constants c_d and τ_h are given by Equations 9 and 10:

$$c_d = 3 \sqrt{\frac{R_g T_p}{Q_a}} \quad (9)$$

$$\tau_h = \frac{(1 - R_c)P}{2\pi K e V (T_p - T_0)} \quad (10)$$

Here K the thermal conductivity, V is the scanning speed, T_0 is the initial temperature and R is the reflection coefficient. The homogenization mechanism is simple: around a ferrite grain and a cementite grain, an austenite germ can be created. This germ is formed by eutectoid transformation with a chemical composition of 0.8% C. As the temperature rises it undergoes a systematic change in its composition. Rapid cooling of the austenite, which is formed only within a thin layer during laser hardening due to the self-sealing of the material when the laser beam is moved away, makes it difficult for carbon to diffuse outside its lattice. When the carbon is trapped in the network and cooled, the face centered cubic crystal structure of austenite is transformed into a hybrid quadratic structure, called martensite [5]. The martensitic volume fraction, f , which is formed on a period T, is given by Equation 11:

$$f = f_m - (f_m - f_i) e^{\left[-\frac{12f_i^{2/3}}{g_s \sqrt{\pi}} \ln\left(\frac{C_e}{2C_c}\right) \frac{l_p^2}{\sqrt{2}} \right]} \quad (8)$$

With $f_i = C/0.8$ as the initial volume fraction of pearlite and f_m is the volume fraction of martensite given by the following relationship:

$$\begin{cases} 0 & \text{if } T_p < A_1 \\ f_i + (1 - f_i) \frac{T_p - A_1}{A_{c3} - A_1} & \text{if } A_1 < T_p < A_{c3} \\ 1 & \text{if } T_p > A_{c3} \end{cases} \quad (9)$$

The hardness of the material is calculated as follows:

$$H = fH_m + (1 - f)H_{f+p} \quad (10)$$

Following the Maynier's equations and taking into account the initial chemical composition is calculated H_m et H_{f+p} [10–11].

2.6 SIMULATION RESULTS

This study investigates the machine sensitivity parameters of laser heat treatment of an AISI 4340 steel spline shaft. The AISI 4340 steel is very common in the aerospace and automotive industries in the manufacture of propeller shafts, connecting rods, gear shafts and other automobiles parts, due to its high tensile strength. The AISI 4340 chemical composition being given in Table 11. The sample used in the simulations and validation is 15 mm in diameter, 2.5 mm in thickness and is inclined at an angle of 20 °C. Primary results of the simulation of heat treatment showed that there is no heat affected area and the temperature does not exceed 350 °C, even with a speed of 2 mm/s, a power of 2500 W, and rotation speed of 1500 RPM. The results are experimentally validated. To achieve a heat affected zone by the laser beam, it must pass through a preliminary heating. Multiple scanning was carried out to increase the original sample temperature from 20 °C to 500 °C. Table 12 shows the material properties used for the simulation.

It is clear in figure 19 that the laser is in the process of turning around the spline shaft, treating both the tooth and the flank. The temperature rises to 837 °C with a rotational speed of 1000 RPM, a scanning speed of 5 mm/s, and a power of 2200 W. Note that the austenitizing temperature is 790 °C.

Table 11: Chemical composition of steel AISI 4340

Element	Content (wt %)
C	0.38-0.43
Cr	0.70-0.90
Mn	0.60-0.80
Mo	0.20-0.30
Ni	1.65-2.00
P	0.040max
Si	0.20-0.35
S	0.040max
Fe	Balance

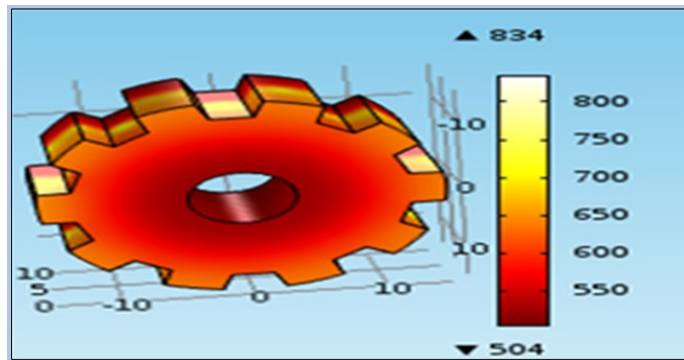


Figure 19: Distribution of Temperature

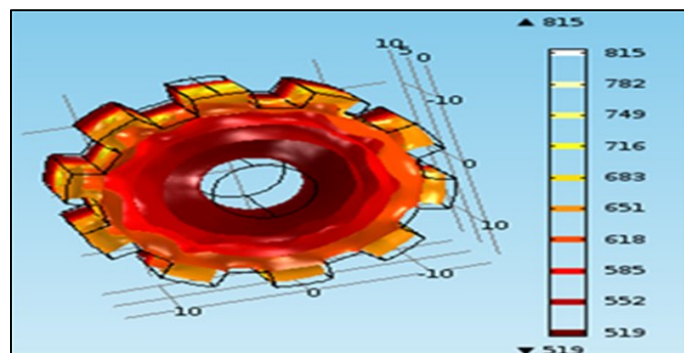


Figure 20: Distribution of Heat Flux

Figure 20 and figure 21 show that the temperature progressively increases approaching the measurement point, then gradually decreases away from the measurement point. It is clear that the temperature increases and decreases when the laser beam turns around the spline shaft.

Table 12: Material properties

Property	Symbol	Unit	Value
Reflexion coefficient	Rc		0.6
Steel absorptivity	Ac	m ⁻¹	800
Eutectoid temperature	Ac1	K	996
Austenitization temperature	Ac3	K	1063.15
Austenite grain size (assumed)	g	µm	
Activation energy of carbon diffusion in ferrite	Q	KJ/mol	10
Pre-exponential for diffusion of carbon	D0	m ² /s	80
Gas constant	R	J/mol. K	6.10 ⁻⁵
Steel carbon content	C		0,34 %
Austenite carbon content	Ce		0,8 %
Ferrite carbon content	Cf		0.01%
Critical value of carbon content	Cc		0.05%
Volume fraction of pearlite colonies	fi		0.5375

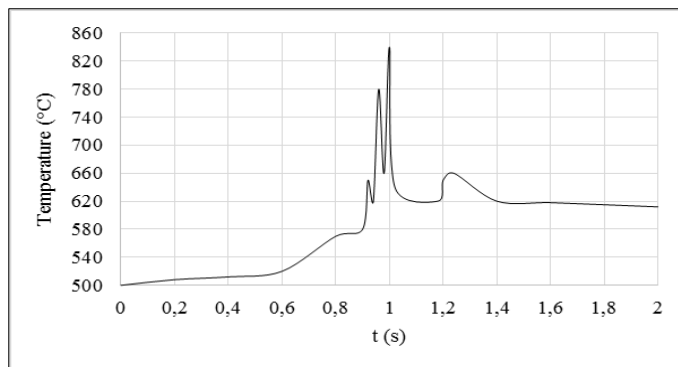


Figure 21: The Evolution of Temperature Versus Time (x=5, y=0, z=15)

2.7 EXPERIMENTAL VALIDATION

A YAG laser with a maximum power of 3 KW was used to validate the finite element model. The laser head is mounted on a Fanuc robot with six degrees of freedom (see figure 22 left). The laser beam diameter is evaluated at 1.08 mm when focused. The specimens are treated by a hardening and tempering process to ensure a core hardness of 35 HRC. The latter is the untreated area. The prediction algorithm is intended to look at the hardened area. Two validation tests shown in table 13, are performed to validate the hardened depth at the tooth (D_t) and the flank (D_f).

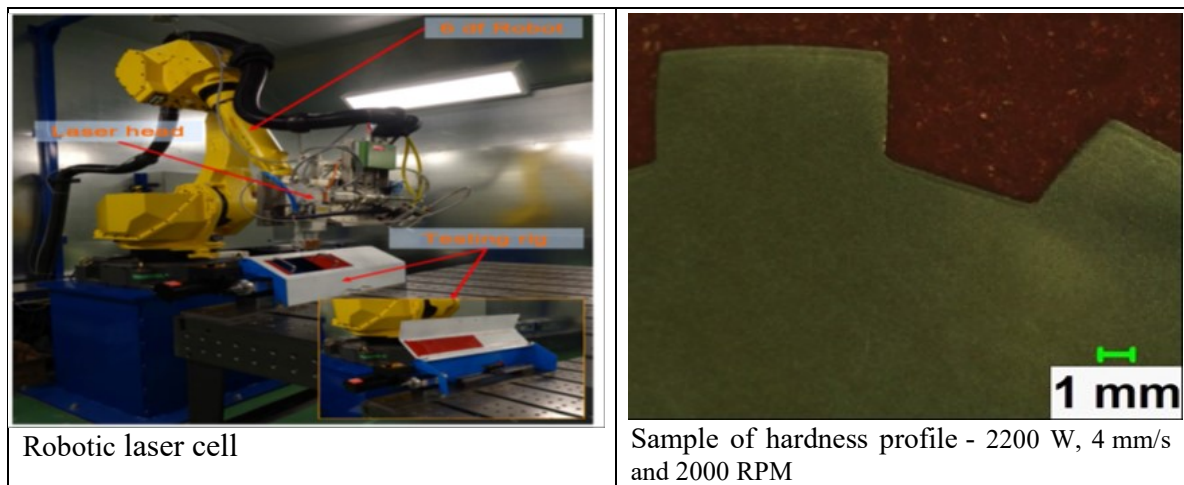


Figure 22: Experimental setup—robotic laser cell.

Table 13: Validation Test

Test	P	V	W
1	2500	4	1500
2	2200	4	2000

The curve describing the hardness profile is divided into three zones. The first is the hardened zone, consisting of 100% martensite. The second is the transition zone, consisting of ferrite, perlite and martensite. The third zone is the untreated area. The transition zone is not considered in the modeling. The modeling of the transition zone with precision depends

on two main parameters: the cooling rate and the initial hardness of the material. In the figures 22, 23 and 24, we can see that the error of modeling the martensitic area is below 15%. The tests show that the flank hardened depth is always less than or equal to the depth of the hardened tooth.

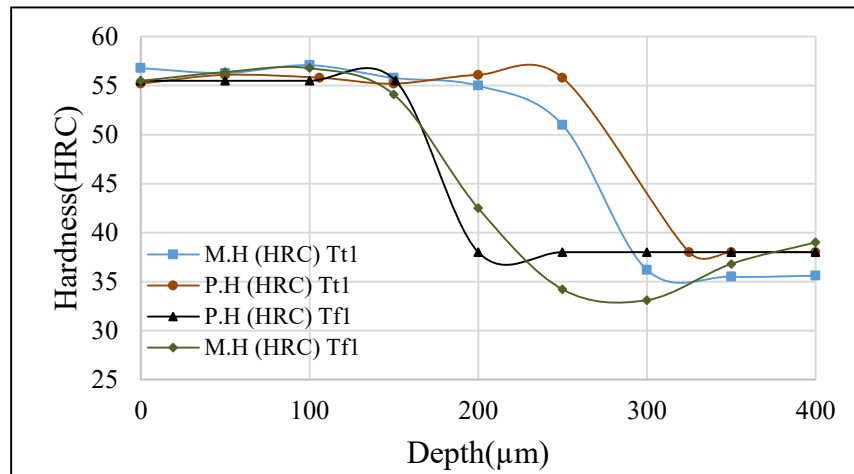


Figure23: Test hardness Curve1

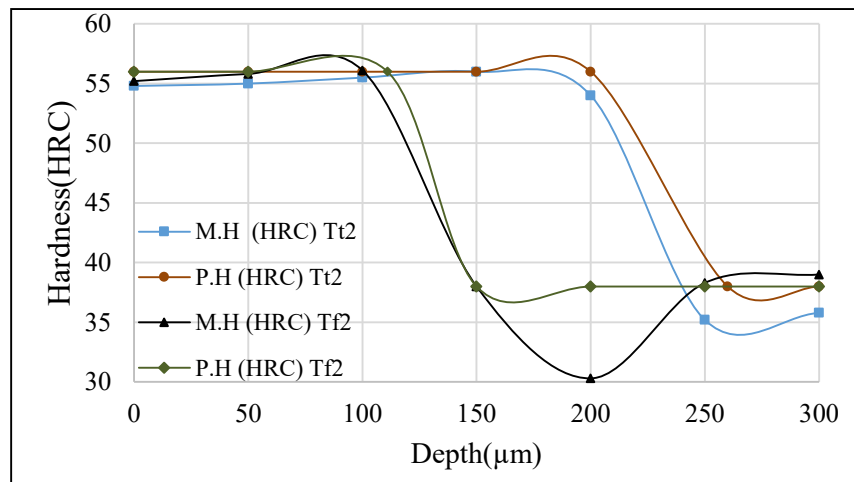


Figure24: Test hardness Curve2

2.8 STATISTICAL ANALYSIS

The objective of this part is to identify the influence of various system parameters on the hardened depth. This is carried out with the help of experiment designs, consisting in producing a series of N experiments and determining the value of the response function for these N configurations. So, in this case, the selected solution is the profile of the hardened depth shown by the two characteristic measurements $\{D_t, D_f\}$. The experiments are carried out using a 3D model with COMSOL software (see Figure 19). The factors to be examined in this study are power, rotary speed and scanning speed. Taguchi proposed that in order to optimize a process or a product, experiments should be carried out in a three-step approach, i.e. system design, parameter design, and tolerance design [28]. The Taguchi orthogonal designs offer to minimize the effect of aliases and measure error with minimum testing. In this context, an orthogonal L9 table (see table 14) of 3 factors and 3 levels was chosen.

Table 14: Experimental planning

Test	P (W)	V (mm/s)	W (RPM)	P _d (μm)	P _f (μm)
1	1900	2	1500	340	144
2	1900	4	2000	111	56
3	1900	6	2500	0	0
4	2200	2	2000	695	308
5	2200	4	2500	260	106
6	2200	6	1500	63	54
7	2500	2	2500	923	407
8	2500	4	1500	325	154
9	2500	6	2000	156	108

The present study used ANOVA to determine the optimum combination of process parameters more accurately by investigating the relative importance of each parameter [29]. Table 5 presents the results of ANOVA for the tooth hardened depth (D_t). It is observed from the results (table 15 and figure 25) that the scanning speed (68.66%) is the most significant parameter, followed by power (25.14%). The rotary speed has the smallest effect (3.02%) in

hardened depth. Statistically, the F-test determines whether the parameters are significantly different. A larger F value shows a greater impact on the machining performance characteristics [29]. Larger F-values are observed for scanning speed, as 25.24, and for power, as 7.18.

Table 15: Variance analysis case of depth (D_t)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value	C (%)
P	2	153,188	76,594	7.18	0.122	25.14
V	2	538,255	269,127	25.24	0.038	68.66
W	2	34,514	17,257	1.62	0.382	3.02
Error	2	21,323	10,661			3.18
Total	8	747,280				100

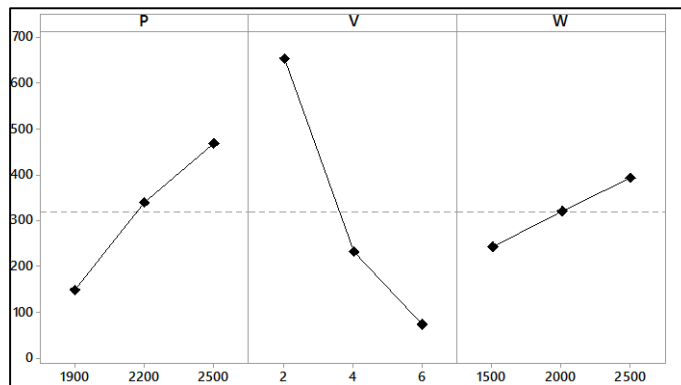
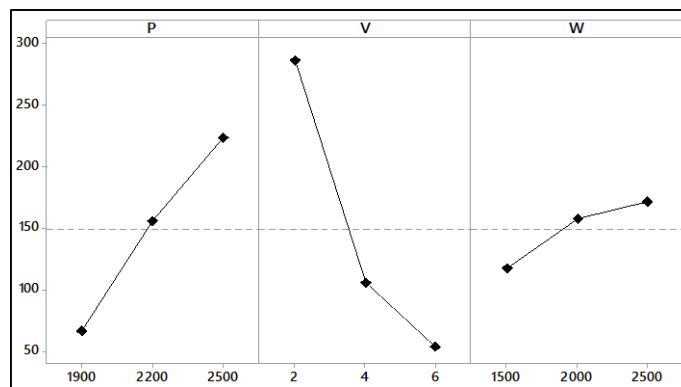


Figure 25: Effect of the parameters on the depth (D_t)

As seen from the ANOVA results in table 16 and figure 26, the influence of the scanning speed (66.06%) in the hardened depth of the flank is significantly larger. The power (27.28%) is the second most significant factor. Again, the rotary speed has the least effect (3.45%) on D_f . It is also observed that there is an error contribution of 3.21% in the hardened depth on the flank.

Table 16: Variance analysis case of depth (D_f)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value	C (%)
P	2	36,910	18,455	8.47	0.105	27.28
V	2	89,375	44,687	20.56	0.046	66.06
W	2	4667	2333	1.07	0.482	3.45
Error	2	4347	2173			3.21
Total	8	135,298				100

Figure 26: Effect of the parameters on the depth (D_f)

2.9 CONCLUSION

In this paper, an integrated approach used to build a hardness profile prediction model for AISI 4340 spline shafts heat treated by laser is presented. Numerical simulation carried out through 3D finite element model using Comsol Multiphysics software is discussed. A commercial 3 kW Nd:Yag laser system, a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools are used to conduct the experimental study for the prediction model calibration and validation. The results reveal that the numerical simulation can effectively lead to a consistent and accurate model and provide an appropriate prediction of the hardness profile attributes under variable hardening parameters and conditions. With an average error less than 15% and more than 95% as correlation coefficient, the validation process shows great concordance between predicted and experimental results.

2.10 REFERENCES

- [1] Kannatey-Asibu Jr., E. (2009) Principles of Laser Materials Processing. Vol. 4, John Wiley & Sons, Hoboken, 860.
- [2] Steen, W., Watkins, K.G. and Mazumder, J. (2010) Laser Material Processing. Springer, London.
- [3] Chattopadhyay, R. (2004) Laser Assisted Surface Engineering Processes. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [4] Goia, F. and de Lima, M. (2011) Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser. Journal of ASTM International, 8, 315–318.
- [5] Tobar, M.J., Álvarez, C., Amado, J.M., Ramil, A., Saavedra, E. and Yáñez, A. (2006) Laser Transformation Hardening of a Tool Steel: Simulation-Based Parameter Optimization and Experimental Results. Surface and Coatings Technology, 200, 6362–6367.
- [6] 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.
- [7] Badkar, D.S., Pandey, K.S. and Buvanashakaran, G. (2011) Parameter Optimization of Laser Transformation Hardening by Using Taguchi Method and Utility Concept. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 52, 1067–1077.
- [8] Grum, J. and Kek, T. (2004) The Influence of Different Conditions of Laser-Beam Interaction in Laser Surface Hardening of Steels. Thin Solid Films, 453, 94–99.
- [9] Kar, A. and Mazumder, J. (1989) Three-Dimensional Transient Thermal Analysis for Laser Chemical Vapor Deposition on Uniformly Moving Finite Slabs. Journal of Applied Physics, 65, 2923–2934.
- [10] Ion, J. (2005) Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Butterworth-Heinemann, Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- [11] 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.

- [12] Reséndiz-Flores,E.O. and Saucedo-Zendejo,F.R. (2015) Two-Dimensional Numerical Simulation of Heat Transfer with Moving Heat Source in Welding Using the Finite Pointset Method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 239–245.
- [13] Yang,J., Sun,S., Brandt,M. and Yan,W. (2010) Experimental Investigation and 3D Finite Element Prediction of the Heat Affected Zone during Laser Assisted Machining of Ti6Al4V Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*,210, 2215–2222.
- [14] Toyserkani,E., Khajepour,A. and Corbin,S. (2004) 3D Finite Element Modeling of Laser Cladding by Powder Injection: Effects of Laser Pulse Shaping on the Process. *Optics and Lasers in Engineering*, 41, 849–867.
- [15] Safdar,S., Li,L. and Sheikh,M.A. (2007) Numerical Analysis of the Effects of Non-Conventional Laser Beam Geometries during Laser Melting of Metallic Materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40, 593–603.
- [16] Sheikh,M.A. and Li,L. (2010) Understanding the Effect of Non-Conventional Laser Beam Geometry on Material Processing by Finite-Element Modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224, 1061–1072.
- [25] Majumdar,J.D. and Manna,I. (2015) Laser Surface Engineering. In: Nee, A.Y.C., Eds., *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer, London, 2639–2676.
- [26] Kakhki,M.E., Kermanpur,A. and Golozar,M.A. (2009) Numerical Simulation of Continuous Cooling of a Low Alloy Steel to Predict Microstructure and Hardness. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 17.
- [27] Carlone,P., Palazzo,G.S. and Pasquino,R. (2010) Finite Element Analysis of the Steel Quenching Process: Temperature Field and Solid-Solid Phase Change. *Computers & Mathematics with Applications*, 59, 585–594.
- [28] Yung,K.C. and Zhang,B. (2010) Analysis of Process Parameters of Laser Structuring with Taguchi Method. *Applied Physics A*, 101, 385–392.
- [29] Mason, R.L., Gunst,R.F. and Hess,J.L. (2003) *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. John Wiley & Sons, Hoboken.

CHAPITRE 3
EFFETS DES PARAMÈTRES DE LA MACHINE ET DES PARAMÈTRES DE
CONCEPTION SUR LA PROFONDEUR DE DURCISSEMENT D'UN ARBRE
CANNELÉ EN ACIER 4340 TRAITÉ THERMIQUEMENT PAR LASER —
ANALYSE STATISTIQUE ET RÉSEAU DE NEURONES

3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE

Plus d'un demi-siècle après le premier traitement thermique, le processus est toujours soumis à l'attention des chercheurs, et la recherche est toujours en cours pour améliorer la qualité du traitement thermique laser. L'interaction laser-matière est un phénomène complexe, influencé par plusieurs facteurs (puissance laser, vitesse de balayage, diamètre et forme de la tache laser, vitesse de rotation [partie révolutionnaire]). L'influence de ces facteurs sur la microstructure, la dureté et la contrainte résiduelle a été étudiée dans de nombreux ouvrages. La revue de la littérature montre toutefois la rareté des études concernant le processus des pièces complexes rotatives.

Cet article présente une modélisation prédictive précise du processus de durcissement au laser en fonction de paramètres de fonctionnement du laser et des paramètres de conception. Une analyse de la profondeur de durcissement d'un arbre cannelé en acier 4340, traité par laser en utilisant des tests expérimentaux. Une série de tests est prévue à l'aide d'une matrice Taguchi. Les résultats obtenus sont analysés en utilisant l'analyse de variance afin d'en extraire les effets et les contributions de chacun des facteurs. Les facteurs choisis sont l'angle d'inclinaison, la profondeur du flanc, la puissance du laser, la vitesse de balayage et la vitesse de rotation. Basé sur une approche de planification systématique et expérimentale en utilisant des outils de réseaux de neurones, un modèle prédictif robuste a été développé.

Ce troisième article, intitulé « Effects of machine Parameters and design Parameters on hardened Depth of 4340 Steel Spline Shaft Specimen treated by laser -A Statistical Analysis and neural network modeling », a été élaboré par le professeur Abderrazak El Ouafi et moi-

même. Il est en révision finale pour être soumis au journal « Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology ». En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a consisté essentiellement à réaliser la recherche bibliographique, le développement de la méthode, la modélisation, et la rédaction de l'article. Le professeur Abderrazak El Ouafi a fourni l'idée originale et a contribué au développement de la méthode ainsi qu'à la rédaction de l'article.

3.2 ABSTRACT

Laser surface transformation hardening became one of the most important tool to heat treat parts with complex geometries due to its flexibility. To appropriately exploit the benefits presented by the Laser heat treatment, it is necessary to develop a comprehensive strategy to control the process variables in order to produce desired hardened surface attributes. This paper presents an integrate approach to develop a robust model for predicting the hardness profile of spline shafts heat treated by laser. Based on experimental design and artificial neural networks concept (ANN), the proposed approach is constructed by (i) performing a series of experimental tests using a structured experimental design, (ii) evaluating the effects of material properties, the geometric attributes of the treated mechanical parts and various laser heating system parameters on the surface hardness, the hardness depth and the hardness profile with the aid of confirmed statistical analysis tools and (iii) integrating the parameters having the most significant impact on the hardness profile variation using neural networks for the global predictive model. The experimental tests of the model are performed on a 3 kW Nd:Yag laser system. The results confirmed not only the feasibility of the approach but revealed its effectiveness by leading to an accurate and effective prediction model.

Keywords: Laser Hardening; Laser Treatment; Experimental Data; ANOVA; ANN.

3.3 INTRODUCTION

The laser heat treatment is a major focus of researchers, more than half a century after the first heat treatment, and research is still ongoing to improve the quality of laser heat treatment processes. The laser-material interaction is complex and is influenced by several factors (laser power, scanning speed, diameter and shape of the laser spot, rotational speed for revolutionary parts, and much more). The influence of these factors on microstructure, hardness and residual stress has been studied in many works. [1–3].

The majority of researchers have focused mainly on the study of this process on gears. Benedict and Eskildsen patented an approach to treat small gears, which proved very promising. In fact, this method consists of the laser beam scanning from one gear tooth's tip to another while varying the angle of incidence, the power, and the interaction time (forward speed) [4]. In 2003, Zhang et al. used this approach to treat sprockets with a 98 mm outside diameter and containing 23 teeth. They were installed on a mounting allowing the wheel to be moved laterally and brought into rotation. The results were very conclusive: the cured depth of the flanks is of a relatively uniform thickness and is not a stressed fusion surface [5]. However, no modeling process was presented. Pretorius and Vollertsen (Pretorius and Vollertsen, 2009) modeled a form of laser heat treatment on a toothed wheel in which the heat treatment was applied only to the tooth root. The 3D digital model was developed using the SYSWELD package and consisted of modeling the thermal flow, metallurgical transformations, and geometrical deformations [6].

Clearly, the modeling of heat treatment of revolutionary complex geometries is limited. Among these geometries are spline shafts. Until now, there has been no experimental study which presents the laser heat treatment of the spline shaft. Due to their ability to transmit large torques and their ease of machining, spline shafts have become the essential tools for power transmission [7]. The present work is a continuation of a thermal treatment project on spline shafts. In a previous paper a model validated by practical tests was presented. The objective was to find the influence of machine parameters on hardened depth using a validated 3D model (see Figure 27). The preliminary simulation showed that the temperature does not reach the austenization temperature without preliminary heating. In that investigation a preliminary heating up to 500 °C was performed. The input variables selected in that study were power, speed, and scanning speed. The Taguchi method was selected to determine the matrix of experiments. The ANOVA method was exploited to study the effects and the contributions of each parameter in order to identify the essential parameters. The selected solution was the hardened depth shown by the two characteristic measures tooth and flank depth $\{D_t, D_f\}$. The hardened depth of tooth (D_t) was observed from the ANOVA table; the scanning speed (68.66%) is the most significant parameter, followed by power (25.14%).

However, the rotary speed has less of an effect (3.02%) on hardened depth. For hardened flank depth (D_f), the influence of the scanning speed (66.06%) is significantly larger. The power (27.28%) is the next most significant factor.

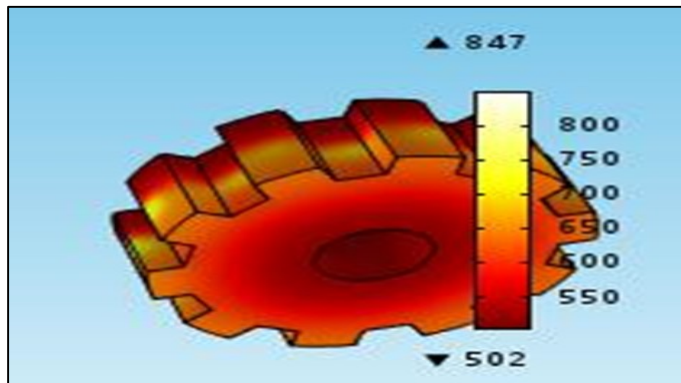


Figure 27: Distribution of Temperature and Heat Flux ($t=1.58s$).

The rotation speed has the least effect (3.45%) on D_f . In the previous study only machine settings were chosen. The dimensioning of a spline shaft is performed using a number of simplifying assumptions, which proved to be far from the reality of the results obtained experimentally. For most industrial applications, standard dimensions are used, as well the design is based on simple coupled hypotheses which ensures good operation. But in certain fields, such as aeronautics, a design is based on a strong hypothesis, as over sizing causes problems. (see Figure 28).

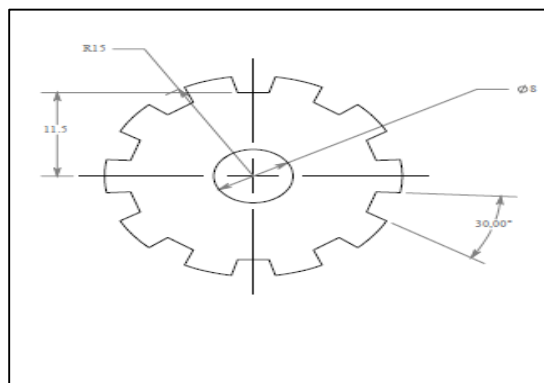


Figure 28: Design parameters of splined shafts

The aim of this work is to investigate the effect of adding design parameters of spline shafts on hardened depth using the Taguchi method. The authors propose an original sensitivity study, able to exhibit the effect and contribution of each parameter by taking into consideration the laser technology, the material, the geometry, and the machine parameters. The choice of parameters and levels are based on the previously mentioned study.

3.4 EXPERIMENTAL SETUP

A YAG laser with a maximum power of 3 KW was used to validate the finite element model. The laser head is mounted on a Fanuc robot with six degrees of freedom. The laser beam diameter is evaluated at 1.08 mm when focused. The specimens are treated by hardening and tempering to ensure equal hardness of heart equal to 35 HRC. The focal distance is 310 mm with permissible tolerance of $\pm 5\%$. The specimen is mounted in a test stand that allows it to achieve high rotation speeds. After laser heat treatment, the specimens are carefully prepared, polished and etched using a Nital chemical solution (95% ethanol and 5% nitric acid). The micro hardness is measured with a Clemex device. Two experiments were conducted with a random choice of parameters to validate the finite element model. Figure 29 shows the experimental setup.

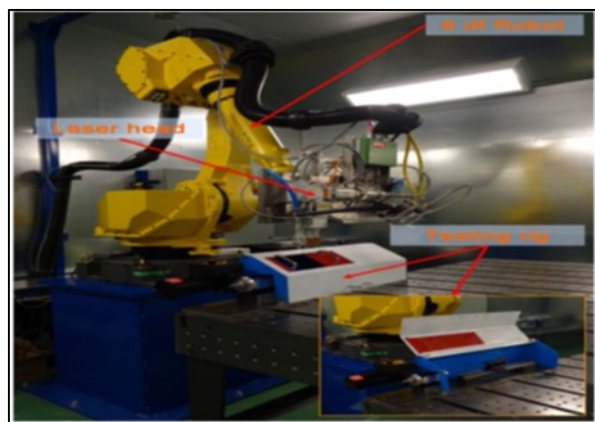


Figure 29: Experimental setup

3.5 EXPERIMENTAL DESIGN

In this study, a sensitivity study of machine parameters was combined with design parameters. The power, scanning speed, and rotational speed were selected as machine parameters. The inclination angle and flank depth were chosen as design parameters. There are several possible experimental designs, but using strategies such as orthogonal arrays (AO) developed by Taguchi remains the best solution; it leads to effective and robust fractional designs. (see Table 17). The Taguchi orthogonal plan offers a minimal effect of measurement errors and aliases with minimal testing. In this context, an orthogonal plan L18 of 5 factors (4 factors to 3 levels and a factor to 2 level) was chosen.

Table 17: Factors and study field

Test	A	D	P	V	W
1	15	2.5	1900	2	1500
2	15	2.5	2200	4	2000
3	15	2.5	2500	6	2500
4	15	3.0	1900	2	2000
5	15	3.0	2200	4	2500
6	15	3.0	2500	6	1500
7	15	3.5	1900	4	1500
8	15	3.5	2200	6	2000
9	15	3.5	2500	2	2500
10	20	2.5	1900	6	2500
11	20	2.5	2200	2	1500
12	20	2.5	2500	4	2000
13	20	3.0	1900	4	2500
14	20	3.0	2200	6	1500
15	20	3.0	2500	2	2000
16	20	3.5	1900	6	2000
17	20	3.5	2200	2	2500
18	20	3.5	2500	4	1500

3.6 EXPERIMENTAL RESULTS

The splines are mounted on a rotating test bench. 6 models of spline shafts have been used which represents the various design parameters. As mentioned at the top of the article, machine parameters are selected according to the results of previous paper. For an angle of 15° , a side depth of 2.5 mm, a power of 1900 W, a scanning speed of 2 mm / s, and a rotational speed of 1500 RPM, a hardened depth of 200 μm was found. (see Figure 31, 32 and 33). In another experiment, an angle of 20° , a side depth of 3 mm, a power of 2500 W, a scanning speed of 2 mm / s, and a rotational speed of 2000 RPM, a hardened depth of 950 μm was found (see Figure 30, 32 and 33).



Figure 30: Hardness profile —2500 W, 4 mm/s and 2000 RPM

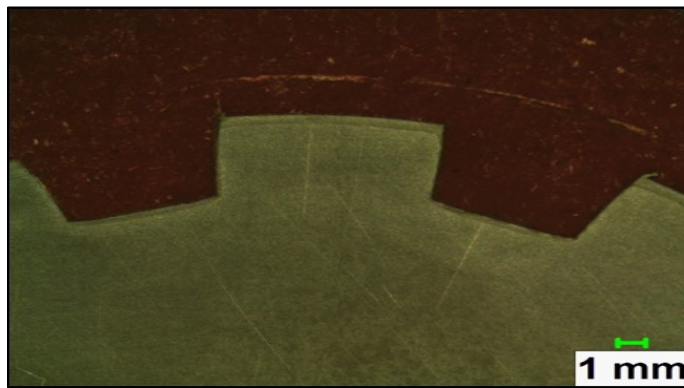


Figure 31: Hardness profile —1900 W, 2 mm/s and 1500 RPM

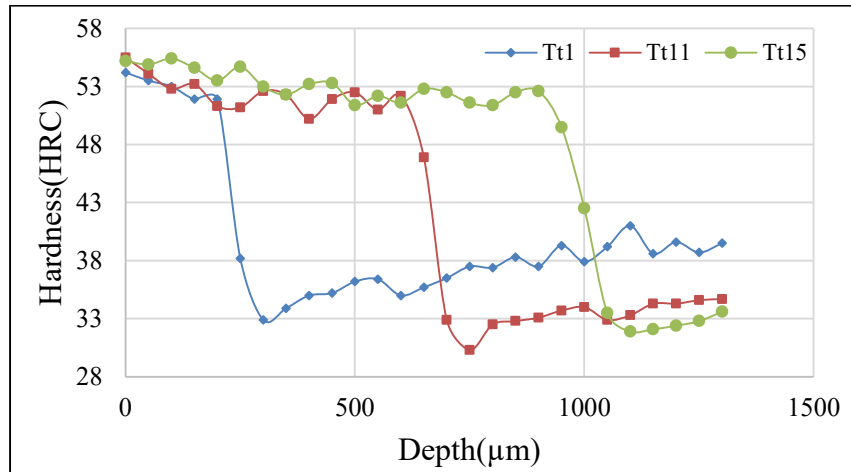


Figure 32: Hardness tooth curves

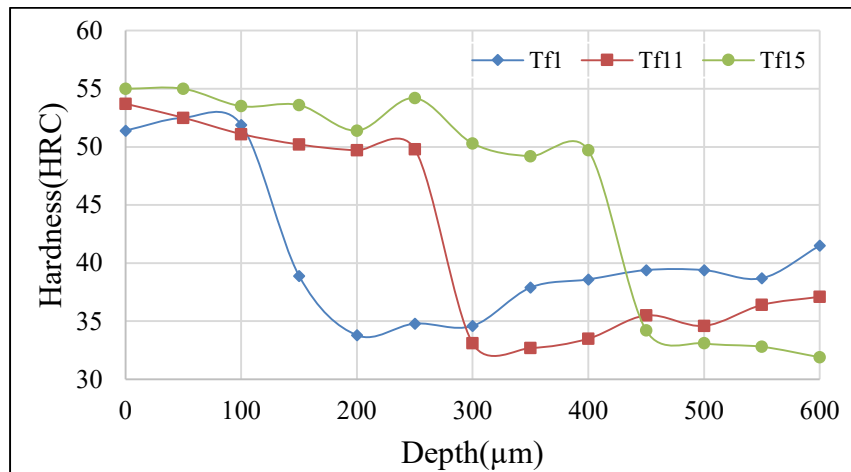


Figure 33: Hardness flank curves

3.7 STATISTICAL ANALYSIS

Table 18 and Table 19 summarize the effect estimates, sums of squares, percent contribution and P-values from the analysis of variance for the tooth and flank hardened depths. The percent contribution is a rough but effective guide to the relative importance of each model term [8]. P-value is the smallest level at which the data are significant. The P-value approach is adopted widely in practice, because it makes it possible for a decision

maker to draw a conclusion at any specified level of significance. Table 18 and Figure 34 present the results of ANOVA for the hardened tooth depth (D_t). As is observed from the ANOVA results shown in Table 18, the scanning speed (67.71%) is the most significant parameter, followed by power (23.13%). The rotary speed, the flank depth, and the angle had the least effect (3.99%) on hardened depth.

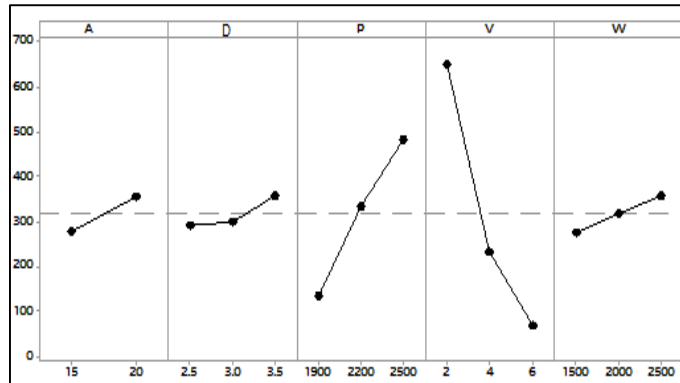


Figure 34: Effect of the parameters on the depth (D_t)

Table 18: Variance analysis case of depth (D_t)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F— Value	P— Value	C (%)
A	1	27,222	27,222	2.63	0.143	1.70
D	2	15,833	7917	0.77	0.497	0.99
P	2	370,000	185,000	17.88	0.001	23.13
V	2	1,083,333	541,667	52.35	0.000	67.71
W	2	20,833	10,417	1.01	0.407	1.30
Error	8	82,778	10,347			5.17
Total	17	1,600,000				100

Statistically, F-tests decide whether the parameters are significantly different. A larger F value shows a greater impact on the machining performance characteristics [8]. Larger F-values are observed for a scanning speed of 52.35 and a power of 17.88. The coefficient {P, V} is zero, confirming the significance of the power and the scanning speed. The error contribution of 5.17% is low for hardened tooth depth. It is clear from Figure 36 that the angle and depth of the flank have no effect on the hardened depth of the tooth. As seen from the ANOVA results in Table 19 and Figure 35, the influence of the scanning speed (68.49%)

on hardened flank depth is significantly larger. The power (25.63%) is the next most significant factor. However, the rotary speed, the depth of flank and the angle have the least effect (2.32%) on D_f . It is also observed that there the error contribution of 3.75% is low for hardened flank depth.

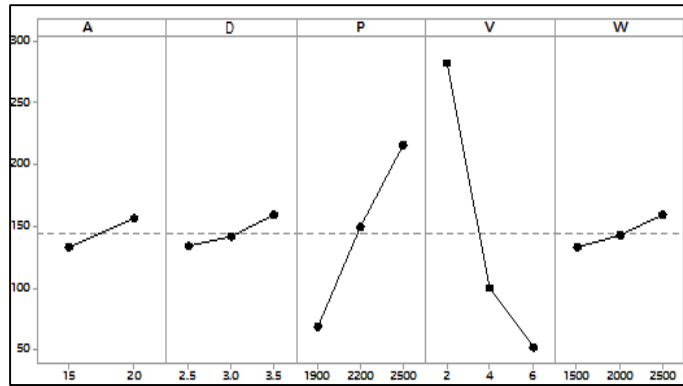


Figure 35: Effect of the parameters on the depth (D_f)

Table 19: Variance analysis case of depth (D_f)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F— Value	P—Value	C (%)
Angle	1	2222	2222.2	1.88	0.207	0.84
Pro	2	1944	972.2	0.82	0.473	0.74
P	2	67,778	33,888.9	28.71	0.000	25.63
V	2	181,111	90,555.6	76.71	0.000	68.49
W	2	1944	972.2	0.82	0.4 73	0.74
Error	8	9444	1180.6			3.57
Total	17	264,444				100

3.8 PREDICTION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Neural networks are an important component of the field of artificial intelligence. By analogy to biological neurons, artificial neural networks aim to reproduce “intelligent” arguments in an artificial manner [9]. Artificial neural networks have many structures and architectures. Multilayered perceptrons (MLPs) are the simplest and therefore the most commonly used neural network architecture. An MLP consists of several layers. The first

layer is for the inputs and the final layer is for the outputs. The number of intermediate layers depends on the complexity of the problem. Here two neural network models of 5 inputs and one output was established, the outputs being the hardened tooth depth (D_t) and the hardened flank depth (D_f). The five input parameters were A, D, P, V and W. A single hidden layer of 10 neurons was used. The sigmoid function was used as the activation function. Furthermore, the values of the determination coefficients, $R_{\text{training}}(D_f) = 99.99\%$ and $R_{\text{training}}(D_t) = 99.95\%$ (see Table 20), were good, which indicates that the models are relatively well adjusted and that there is a good correlation between the measured values and the calculated ones (see figure 36 and 37).

Table 20: Coefficient of determination

	Rtraining	Rvalidation	Rtotal
D_t	0.99955	0.98104	0.9943
D_f	0.99993	0.99515	0.99501

An orthogonal matrix L8, based on the Tagushi method, was used in the validation experiments. The validation matrix was injected into the same neural network programs used previously. The results found in the validation are satisfactory and show that the model is reliable for predicting the effect of input parameters on hardness.

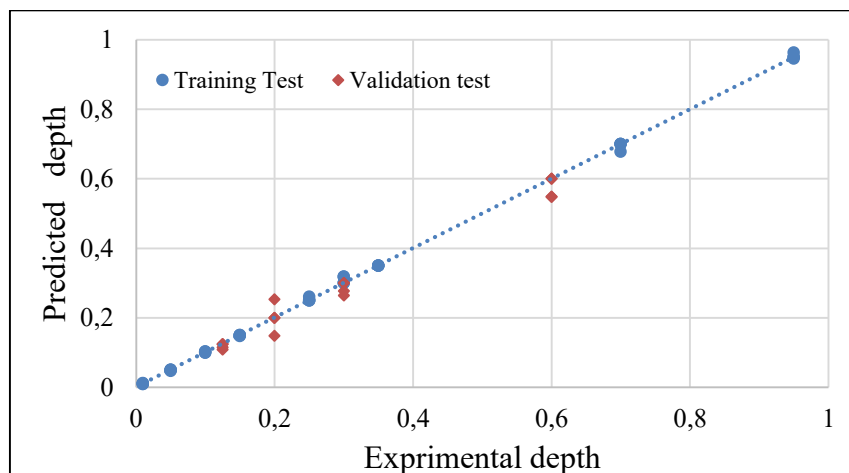


Figure 36: Scatter plots simulation and prediction (D_t)

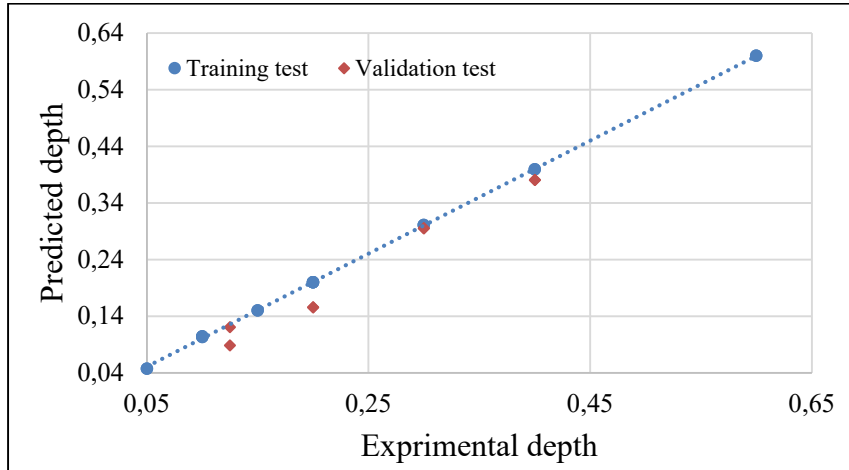
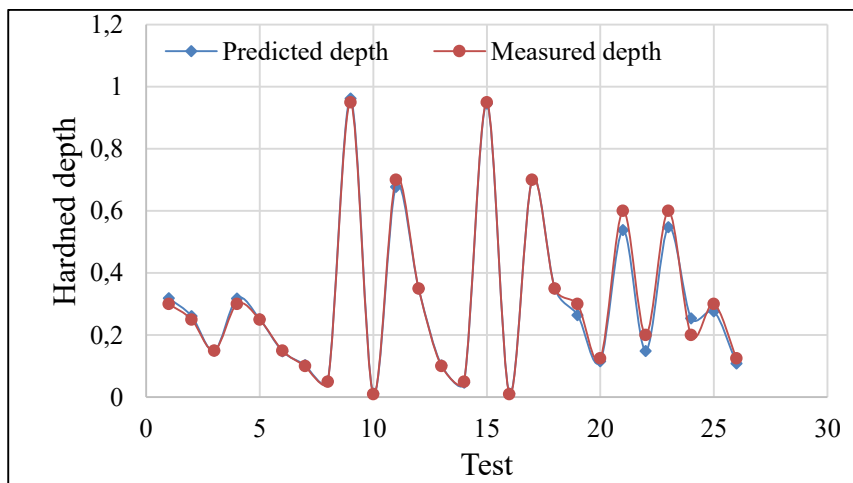
Figure 37: Scatter plots simulation and prediction (D_f)

Table 21: Factors and validation data

Factor	A	D	P	V	W
Levels	15	3.5	2050	3	1750
	20	2.5	2350	5	2250

Figures 36 and 37 show that the values of the determinations coefficients of the validation tests for D_t and D_f are 98,104 and 99,515, respectively. This implies a very good prediction capacity.

Figure 38: Predicted and measured hardened depth (D_t)

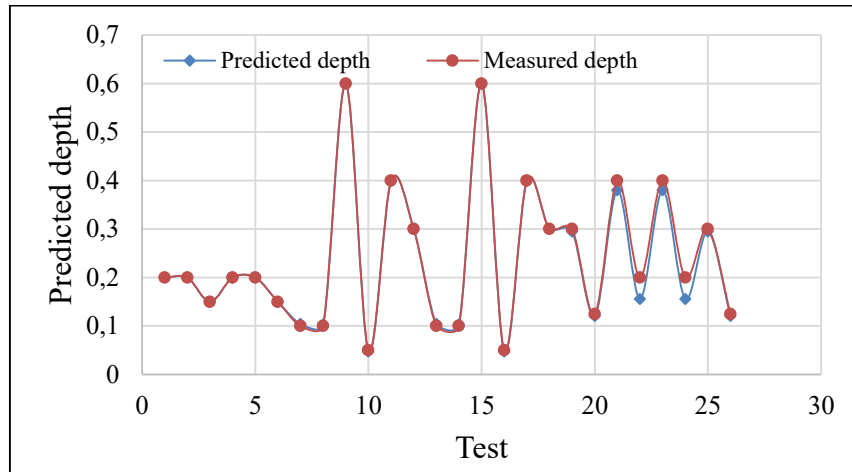


Figure 39: Predicted and measured hardened depth (D_f)

Figures 38 and 39 present the measured and predicted curves for the hardened depth. In the studied ranges of the process parameters (orthogonal array L18), it is possible to predict the case depth with good precision, and an average error not exceeding 1.8% for D_t and 0.2% for D_f . The absolute difference between the measured depth and the predicted depth is less than 0.06 mm for each case. Moreover, the average error of the validation shows good accuracy and does not exceed 13% for D_t and 8% for D_f .

3.9 CONCLUSION

In this study, an integrate approach used to build a hardness profile prediction model for AISI 4340 spline shafts heat treated by laser is presented. Several laser hardening parameters, such as material properties, geometric attributes and various laser heating system parameters were analyzed and their correlation with multiple performance characteristics of hardened surface was investigated. A commercial 3 kW Nd:Yag laser system, a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools are used to accomplish the

experimental study. After identifying the parameters having the most significant impact on the hardness profile variation, an ANN based modelling approach was proposed to build an accurate and consistent hardness profile prediction model. With a maximum error less than 13% and more than 95% as correlation coefficient, the validation process shows great concordance between predicted and experimental results.

3.10 REFERENCES

- [1] Kannatey-Asibu Jr, E. (2009). Principles of laser materials processing (Vol. 4). John Wiley & Sons.
- [2] Steen, W., Watkins, K.G., & Mazumder, J. (2010). Laser material processing. Springer Science & Business Media.
- [3] Chattopadhyay, R. (2004). Laser Assisted Surface Engineering Processes. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes, 157–192.
- [4] Benedict, G.F., & Eskildsen, J. (1985). U.S. Patent No. 4,539,461. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [5] Zhang, H., Shi, Y., Xu, C.Y., & Kutsuna, M. (2003). Surface hardening of gears by laser beam processing. *Surface engineering*, 19 (2), 134–136.
- [6] Pretorius, T., & Vollertsen, F. (2009). Simulation of the distortion manipulation of gear wheel teeth by thermal pre-stressing. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 40(5-6), 479-484.
- [7] Barsoum, I., Khan, F., & Barsoum, Z. (2014). Analysis of the torsional strength of hardened splined shafts. *Materials & Design*, 54, 130–136.
- [8] Mason, R.L., Gunst, R.F., & Hess, J.L. (2003). Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science (Vol. 474). John Wiley & Sons.
- [9] Dhara, S. K., Kuar, A. S., & Mitra, S. (2008). An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (1–2), 39–46.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce projet de recherche consiste donc à développer des modèles prédictifs capables de produire des estimations quantitatives des attributs physiques et géométriques de la surface durcie (dureté, profondeur durcie et profil de dureté) dans le cas de traitement thermique de pièces en acier AISI 4340 avec des géométries complexes. Les arbres cannelés ont été choisis comme exemple de géométrie en vue d'illustrer les approches proposées aussi bien pour la modélisation et la simulation que pour les expérimentations. L'approche repose sur cinq phases complémentaires : (i) la modélisation 3D thermique et métallurgique du procédé pour des géométries simples, (ii) l'expérimentation et la validation du modèle 3D (iii) l'adaptation du modèle 3D pour des géométries complexes, (iv) la simulation et l'étude de sensibilité et (v) la modélisation par réseaux de neurones. Les résultats obtenus dans les différentes phases ont été intégrés dans les chapitres faisant l'objet de trois articles.

Le premier article présente une étude préliminaire sur la prédiction du profil de dureté d'un cylindre en acier AISI 4340 traité thermiquement par laser. Le principe du traitement consiste à déplacer le faisceau le long de l'axe du cylindre en rotation. Une modélisation par éléments finis a été réalisée en se basant sur la méthode de Rosenthal. Les équations métallurgiques sont intégrées au modèle sous forme d'algorithmes capables de reconstruire les profils de dureté à partir de matrices représentant les historiques des températures générées par les modèles thermiques. La vitesse de balayage, la vitesse de rotation et la puissance du laser sont les paramètres utilisés pour le contrôle du modèle. Les simulations ont montré que la vitesse de balayage et la puissance ont une influence majeure sur la température de traitement contrairement à la vitesse de rotation qui a une influence négligeable surtout pour des vitesses supérieures à 4000 RPM. Ces résultats ont été validés expérimentalement. Les données expérimentales montrent qu'il existe une forte cohérence entre les résultats pratiques et les résultats de simulation. L'erreur maximale ne dépassant pas 15 %. Une étude de sensibilité des paramètres a été réalisée en se basant sur la méthode de Taguchi. Cette étude confirme les résultats obtenus et montre que la vitesse de balayage

contribue pour plus de 67,7 % dans la variation de la profondeur de durcissement. La puissance contribue pour de 18,75 %. L'interaction entre la puissance et la vitesse de balayage a une contribution de 12,64 %. À partir de ces résultats, un réseau de neurones a été utilisé comme modèle simplifié pour la prédiction du profil de dureté. Avec une erreur maximale de moins de 11 %, le modèle prédictif est considéré comme très satisfaisant.

Le deuxième article présente un modèle de prédiction du profil de dureté d'un arbre cannelé en acier 4340 traité thermiquement par laser en utilisant un modèle 3D adapté à la géométrie et validé expérimentalement. Le principe de traitement de l'arbre cannelé est similaire à celui du cylindre d'arbre. Les simulations préliminaires ont montré que la température générée par la source laser ne parvient pas à la température d'austénitisation sans chauffage préliminaire. Pour remédier à cette situation, un préchauffage à 500 °C a été adopté. La vitesse de balayage, la vitesse de rotation et la puissance du laser sont les paramètres utilisés pour le contrôle du modèle. La méthode Taguchi a été utilisée pour la planification des expériences. ANOVA a été exploitée pour analyser les effets et les contributions des différentes variables afin d'identifier les paramètres ayant l'impact le plus significatif sur la variation du profil de dureté. La puissance et la vitesse de balayage se sont encore révélées comme étant les paramètres les plus influents sur la profondeur de durcissement.

Le troisième article combine les données expérimentales et les données de simulation pour évaluer et analyser les relations de dépendance entre le profil de dureté et l'ensemble des facteurs reconnus avoir une influence potentielle sur la profondeur de durcissement. Les résultats de cette analyse constituent la base de l'établissement d'un modèle neuronique prédictif global. Cette analyse considère les paramètres du procédé et les attributs géométriques de la pièce à traiter comme facteurs importants. Une planification expérimentale structurée basée sur les matrices orthogonales de Taguchi a été réalisée. Suite à l'expérimentation et à l'analyse de la variance, les résultats révèlent que la contribution des attributs géométriques de la pièce est relativement faible et leur influence sur la profondeur durcie est négligeable contrairement aux paramètres du procédé. Les contributions de la

vitesse de balayage et de la puissance demeurent majeures. Les attributs géométriques de la pièce n'influent certes pas directement sur le profil de dureté cependant leur impact sur des phénomènes tels que la fatigue et le vieillissement thermomécanique est important. Cette analyse montre également qu'il est possible d'arriver à un modèle prédictif relativement satisfaisant en utilisant une régression non linéaire. Cependant, les résultats de la modélisation montrent que ce modèle demeure moins précis et moins flexible que celui obtenu par réseaux de neurones.

Globalement, dans les différentes phases de ce projet, les résultats obtenus se sont avérés très satisfaisants et ont montré une concordance remarquable entre les modèles et les mesures expérimentales. Les remarques et les conclusions les plus pertinentes que l'on peut tirer de ces travaux de recherche peuvent être résumées par les quelques points suivants :

- La vitesse de balayage et la puissance contribuent pour plus de 95 % dans les variations de la profondeur de durcissement.
- La vitesse de rotation a une contribution marginale dans la variation de la profondeur de durcissement. Cependant, les grandes vitesses de rotation améliorent la qualité du traitement en évitant la fusion du métal et en réduisant les effets de la superposition.
- Les attributs géométriques de la pièce à traiter (diamètre, angle, profondeur du flanc, etc.) n'ont pas d'influence directe sur la profondeur de durcissement et sur le profil de dureté.
- Avec des puissances moyennes variant entre 2 et 3 kW, il est nécessaire de passer par un préchauffage entre 450 et 500 °C pour traiter des pièces avec des géométries complexes tels que les cannelures et les engrenages.
- Malgré la complexité de l'interaction laser-matière, la modélisation par la méthode des éléments finis demeure relativement fiable pour simuler le comportement du procédé et prédire le profil de dureté.
- La modélisation prédictive par réseaux de neurones présente des performances plus intéressantes en matière de précision et de fiabilité que celles obtenues par d'autres modèles statistiques.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet sont très encourageants. Ils ont permis de contribuer à la compréhension du comportement du procédé de traitement thermique superficiel par laser dans le cas de traitement de pièces en acier AISI 4340 avec des géométries complexes. Pour la poursuite de ce travail, plusieurs pistes peuvent être envisagées. Il peut s'agir, par exemple, de travailler sur la caractérisation mécanique des pièces après traitement pour évaluer et étudier les contraintes résiduelles, la fatigue et le vieillissement thermomécanique. Il peut également s'agir de développer des techniques d'optimisation pour le choix des paramètres optimaux en fonction de critères spécifiques (dureté maximale, profondeur de durcissement, profil de dureté, résistance en fatigue, etc.).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GOIA,F., & DE LIMA,M. 2011. “Surface hardening of an AISI D6 cold work steel using a fiber laser”. *J. ASTM INT*, 8 (2), 315–318.
- CHATTOPADHYAY,R. 2004. “Laser assisted surface engineering processes”. *Advanced thermally assisted surface engineering processes*, 157–192.
- TOBAR,M.J., ÁLVAREZ,C., AMADO,J. M., RAMIL,A., SAAVEDRA,E., & YÁÑEZ, A. 2006. “Laser transformation hardening of a tool steel: simulation-based parameter optimization and experimental results”. *Surface and coatings technology*, 200 (22), 6362–6367.
- LAKHKAR,R.S., SHIN,Y.C., & KRANE,M.J.M. 2008. “Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel”. *Materials science and engineering: a*, 480 (1), 209–217.
- XIA,M., BIRO,E., TIAN,Z., & ZHOU,Y.N. 2008. “effects of heat input and martensite on haz softening in laser welding of dual phase steels”. *isij international*, 48 (6), 809–814.
- PATWA,R., & SHIN,Y.C. 2007. “Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2), 307–320.
- ROZZI,J.C., PFEFFERKORN,F.E., INCROPERA,F.P., & SHIN,Y.C. 1998. “Transient thermal response of a rotating cylindrical silicon nitride workpiece subjected to a translating laser heat source”, part i: comparison of surface temperature measurements with theoretical results. *Journal of heat transfer*, 120 (4), 899–906.
- ROZZI,J.C., PFEFFERKORN,F.E., INCROPERA,F.P., & SHIN,Y.C. 2000. “Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: i. Comparison of predictions with measured surface temperature histories”. *International journal of heat and mass transfer*, 43 (8), 1409–1424.
- SKVARENINA,S., & SHIN,Y.C. 2006. “Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser”. *Surface and coatings technology*, 201 (6), 2256–2269.

- ORAZI,L., LIVERANI,E., ASCARIA,A., FORTUNATO,A., & TOMESANI,L. 2014. “Laser surface hardening of large cylindrical components utilizing ring spot geometry”. *CIRP annals-manufacturing technology*, 63 (1), 233–236.
- L’INSTITUT MAUPERTUIS, 2011. « La trempe par laser ». *Bulletin Technique N ° 28*
- BENEDICT,G.F., & ESKILDSSEN,J. (1985). U.S. Patent no. 4,539,461. Washington, dc: U.S. Patent and trademark office.
- ZHANG,H., SHI,Y., XU,C.Y., & KUTSUNA,M. 2003. “Surface hardening of gears by laser beam processing”. *Surface engineering*, 19 (2), 134–136., 2003, vol. 19, no 2, p. 134–136.
- PRETORIUS,T., & VOLLERTSEN,F. 2009. “Simulation of the distortion manipulation of gear wheel teeth by thermal pre-stressing”. *Material wissenschaft und werkstofftechnik*, 40(5-6), 479-484.
- TOYSERKANIE., KHAJEPOUR,A., & CORBIN,S. 2004. “3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process”. *Optics and lasers in engineering*, 41 (6), 849–867.
- SAFDAR,S., LI,L., & SHEIKH,M. A. 2007. “Numerical analysis of the effects of non-conventional laser beam geometries during laser melting of metallic materials”. *Journal of physics d: applied physics*, 40 (2), 593.
- KANNATEY-ASIBU JR, E. 2009. “principles of laser materials processing” (vol. 4). John wiley & sons.
- STEEN,W., WATKINS,K.G., & MAZUMDER,J. 2010. “Laser material processing”. *springer science & business media*
- BARSOUM,I., KHAN,F., & BARSOUM,Z. 2014. “Analysis of the torsional strength of hardened splined shafts”. *materials & design*, 54, 130–136.
- MASON,R.L., GUNST,R.F., & HESS,J.L. 2003. “statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science” (vol. 474). john wiley & sons.
- DHARA,S.K., KUAR,A.S., & MITRA,S. 2008. “An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (1–2), 39–46.

- KOMANDURI,R. & HOU,Z.B. 2001. "THERMAL ANALYSIS OF THE LASER SURFACE TRANSFORMATION HARDENING PROCESS". INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, 44, 2845–2862.
- BADKAR,D.S., PANDEY,K.S. & BUVANASHEKARAN,G. 2011. "PARAMETER OPTIMIZATION OF LASER TRANSFORMATION HARDENING BY USING TAGUCHI METHOD AND UTILITY CONCEPT". THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY,52, 1067–1077.
- GRUM,J. & KEK,T. 2004. "THE INFLUENCE OF DIFFERENT CONDITIONS OF LASER-BEAM INTERACTION IN LASER SURFACE HARDENING OF STEELS". THIN SOLID FILMS, 453, 94–99.
- KAR,A. & MAZUMDER,J. 1989. "THREE-DIMENSIONAL TRANSIENT THERMAL ANALYSIS FOR LASER CHEMICAL VAPOR DEPOSITION ON UNIFORMLY MOVING FINITE SLABS". JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 65, 2923–2934.
- ION,J. 2005. "LASER PROCESSING OF ENGINEERING MATERIALS: PRINCIPLES, PROCEDURE AND INDUSTRIAL APPLICATION". BUTTERWORTH-HEINEMANN, ELSEVIER BUTTERWORTH-HEINEMANN, BURLINGTON.
- KOMANDURI,R. & 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.
- RESÉNDIZ-FLORES,E.O. & SAUCEDO-ZENDEJO,F.R. 2015. "TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER WITH MOVING HEAT SOURCE IN WELDING USING THE FINITE POINTSET METHOD". INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, 90, 239–245.
- YANG,J., SUN,S., BRANDT,M. & YAN,W. 2010. "EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND 3D FINITE ELEMENT PREDICTION OF THE HEAT AFFECTED ZONE DURING LASER ASSISTED MACHINING OF TI6AL4V ALLOY". JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY,210, 2215–2222.

- SHEIKH,M.A. & LI,L. 2010. “UNDERSTANDING THE EFFECT OF NON-CONVENTIONAL LASER BEAM GEOMETRY ON MATERIAL PROCESSING BY FINITE-ELEMENT MODELLING”. PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS, PART C: JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING SCIENCE, 224, 1061–1072.
- ZHANG,H., SHI Y., XU,C.Y. & KUTSUNA,M. 2003. “SURFACE HARDENING OF GEARS BY LASER BEAM PROCESSING”. SURFACE ENGINEERING, 19, 134–136.
- MAJUMDAR,J.D. & MANNA,I. 2015. “LASER SURFACE ENGINEERING”. IN: NEE, A.Y.C., EDS., HANDBOOK OF MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY, SPRINGER, LONDON, 2639–2676.
- KAKHKI,M.E., KERMANPUR,A. & GOLOZAR,M.A. 2009. “NUMERICAL SIMULATION OF CONTINUOUS COOLING OF A LOW ALLOY STEEL TO PREDICT MICROSTRUCTURE AND HARDNESS”. MODELLING AND SIMULATION IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 17.
- CARLONE,P., PALAZZO,G.S. & PASQUINO,R. 2010. “FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE STEEL QUENCHING PROCESS: TEMPERATURE FIELD AND SOLID-SOLID PHASE CHANGE”. COMPUTERS & MATHEMATICS WITH APPLICATIONS, 59, 585–594.
- YUNG,K.C. & ZHANG,B. 2010. “ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS OF LASER STRUCTURING WITH TAGUCHI METHOD”. APPLIED PHYSICS A, 101, 385–392.
- SANTHANAKRISHNAN,S., & KOVACEVIC,R. 2012. “HARDNESS PREDICTION IN MULTI-PASS DIRECT DIODE LASER HEAT TREATMENT BY ON-LINE SURFACE TEMPERATURE MONITORING”. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 212 (11), 2261–2271.
- BARKA,N., & EL OUAFLI,A. 2015. “EFFECTS OF LASER HARDENING PROCESS PARAMETERS ON CASE DEPTH OF 4340 STEEL CYLINDRICAL SPECIMEN—A STATISTICAL ANALYSIS”. JOURNAL OF SURFACE ENGINEERED MATERIALS AND ADVANCED TECHNOLOGY, 5 (03), 124.
- MAAMRI,I., EL OUAFLI,A., & BARKA,N. 2014. “PREDICTION OF 4340 STEEL HARDNESS PROFILE HEAT-TREATED BY LASER USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND MULTI REGRESSION APPROACHES”. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGY 4 (6) 14–22.

- MAYNIER,P., DOLLET,J., & BASTIEN,P. 1978. "PREDICTION OF MICROSTRUCTURE VIA EMPIRICAL FORMULAS BASED ON CCT DIAGRAMS. METALLURGICAL SOCIETY AIME, 163–178.
- MAYNIER,P., JUNGSMANN,B., & DOLLET,J. 1977. "SYSTEM FOR THE PREDICTION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF LOW ALLOY STEEL PRODUCTS". HARDENABILITY CONCEPTS WITH APPLICATIONS TO STEEL, 518–545.
- ACHERJEE,B., MISRA,D., BOSE,D., & VENKADESHWARAN,K. 2009. "PREDICTION OF WELD STRENGTH AND SEAM WIDTH FOR LASER TRANSMISSION WELDING OF THERMOPLASTIC USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY". OPTICS & LASER TECHNOLOGY, 41 (8), 956–967.
- BUFFA,G., FRATINI,L., & MICARI,F. 2012. "MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES PREDICTION BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN FSW PROCESSES OF DUAL PHASE TITANIUM ALLOYS". JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES, 14 (3), 289–296.

