



Université du Québec  
à Rimouski

# **PREDICTION DU PROFIL DE DURETÉ DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE DE SURFACE PAR LASER POUR DES ENGRENAGES EN ACIER 4340**

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

© **AMMAR SGHIER**

**Février 2021**



**Composition du jury :**

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

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

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

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

Dépôt initial le 21 décembre 2020

Dépôt final le 5 février 2021



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.



A toute ma famille



## **REMERCIEMENTS**

Je rends un grand hommage à M. Abderrazak El Ouafi pour son encadrement, son soutien et ses conseils judicieux, ainsi que pour sa disponibilité et le temps qu'il a consacré à la réalisation de ce projet. Je tiens aussi à remercier M. Ahmed Chebak pour son co-encadrement.

Je tiens également à remercier mes parents, mes sœurs, mon frère, mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet de recherche.



## RÉSUMÉ

Ce mémoire porte sur le développement d'un modèle capable de prédire le profil de dureté dans le cas de pièces mécaniques à géométrie complexe traités thermiquement au laser. Il présente les résultats d'une investigation numérique structurée des effets thermiques et métallurgiques induits par les propriétés des matériaux et par les paramètres du procédé de traitement sur la dureté surfacique et sur le profil de dureté. Ces résultats ont servi de base pour le développement d'une approche prédictive intégrée du profil de dureté appliquée à des engrenages en acier 4340. L'approche adoptée est structurée en plusieurs étapes combinant investigation expérimentale, modélisation thermique, modélisation métallurgique, simulation numérique 3D, et analyse statistique pour générer la base de données nécessaire au déploiement d'un modèle prédictif rapide, précis et robuste. L'investigation expérimentale a permis de faire une l'évaluation qualitative et quantitative des effets des paramètres et des conditions du traitement sur la variation du profil de dureté. Les expériences ont été réalisées à l'aide d'un laser Nd-YAG 3kW selon une planification d'expériences basée sur la méthode Taguchi. Le modèle numérique 3D, basé sur les équations de transfert thermique et sur les transformation métallurgiques et concrétisé à l'aide de la méthode des éléments finis, a permis de simuler le comportement du procédé dans des conditions difficiles à réaliser expérimentalement. Les résultats expérimentaux ont été utilisés pour la validation du modèle numérique 3D. Le modèle 3D a par la suite été utilisé pour évaluer les effets des paramètres et des conditions du traitement sur la variation du profil de dureté en utilisant des outils statistiques éprouvés. Les réseaux de neurones ont par la suite été utilisés comme support pour le développement du modèle prédictif. Une large base de données combinant données expérimentales et données de simulation a servi à l'entraînement et à la validation du modèle neuronique proposé pour la prédiction. Plusieurs critères ont été utilisés pour l'évaluation de la qualité des prédictions du modèle et de sa capacité de généralisation. Dans cette application, la puissance du laser, la vitesse de balayage et la vitesse de rotation de la pièce à traiter sont les variables utilisées pour prédire les profondeurs durcies aux sommets et aux pieds des dents de l'engrenage. Les résultats montrent que le modèle obtenu présente des erreurs de prédiction ne dépassant pas les 10%.

Mots clés : Durcissement de surface au laser ; Profondeur durcie ; Profil de dureté ; Modèle prédictif ; Modèle 3D ; Réseaux de neurones artificiels ; Méthode des éléments Finis ; ANOVA



## ABSTRACT

This project is devoted to the development of a hardness profile prediction for complex geometry mechanical parts heat-treated using laser. Various results of a structured numerical investigation of the thermal and metallurgical effects induced by materials properties and heating system parameters on the surface hardness characteristics and hardness profile are presented. These results are used as a basis to develop an integrated predictive approach of the hardness profile in the case of 4340 Steel Spur Gears. The proposed approach is structured in several stages combining experimental investigation, thermal modeling, metallurgical modeling, 3D numerical simulation, and statistical analysis to produce the database needed to build a fast, accurate and robust predictive model. Experimental investigations are used to evaluate of the effects of the parameters and conditions of the treatment on the variation of the hardness profile. The experiments were performed using a 3KW Nd-YAG laser according to an adapted experimental design inspired from Taguchi method. The 3D numerical model, based on heat transfer equations and metallurgical transformation is built using finite elements method and validated using experimental results. The model is subsequently used to simulate the process behavior under large and various heating conditions in order to evaluate the effects of the process parameters and conditions on the hardness profile variation using. Neural networks are used as a support for the predictive model building. A large database combining experimental and simulation data was used to train and validate the proposed prediction model. Several criteria are used to assess the quality of the resulting prediction. In this application, the laser power, the scanning speed and the workpiece rotational speed are the variables used to predict the hardened depths at the top and the root of the gear teeth. The results reveal that the resulting prediction model presents good performances with a prediction errors not exceeding 10%.

*Keywords:* Laser surface transformation hardening, Hardened depth; Hardness profile; Predictive model; artificial neural network, 3D model; Finite element method; ANOVA



## TABLE DES MATIÈRES

|   |      |
|---|------|
| REMERCIEMENTS.....  | ix   |
| RÉSUMÉ.....   | xi   |
| ABSTRACT.....   | xiii |
| TABLE DES MATIÈRES.....   | xv   |
| LISTE DES TABLEAUX.....   | xvii |
| LISTE DES FIGURES.....  | xix  |
| LISTE DES SYMBOLES.....   | xxii |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....  | 1    |
| 1.1 LASER.....  | 1    |
| 1.1.1 Principe de fonctionnement de laser.....  | 2    |
| 1.1.2 Types de laser.....   | 3    |
| 1.2 TRAITEMENT THERMIQUE DES MATERIAUX.....   | 4    |
| 1.3 TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS.....  | 6    |
| 1.3.1 L'austénisation.....  | 8    |
| 1.4 TRAITEMENT THERMIQUE DE SURFACE AU LASER.....   | 9    |
| 1.5 DURCISSEMENT PAR TRANSFORMATION DE SURFACE AU LASER.....                                    | 11   |
| 1.5.1 Principe de durcissement par transformation de surface par laser.....                     | 12   |
| 1.6 DURCISSEMENT PAR TRANSFORMATION DE SURFACE AU LASER APPLIQUER AU<br>GEOMETRIES COMPLEX..... | 14   |
| 1.7 PROBLEMATIQUE.....  | 16   |
| 1.8 OBJECTIFS.....  | 21   |
| 1.9 METHODOLOGIE.....   | 21   |

|  |    |
|--|----|
| CHAPITRE 2 FORMULATIONS MATHÉMATIQUES .....  | 25 |
| 2.1    MODELE THERMIQUE .....  | 25 |
| 2.2    MODELE METALLURGIQUE .....  | 27 |
| CHAPITRE 3 SIMULATION NUMÉRIQUE 3D.....  | 33 |
| 3.1    MATERIAUX ET PARAMETRES DE SIMULATION .....   | 33 |
| 3.1.1    Caractéristiques de la pièce .....  | 33 |
| 3.1.2    Propriétés de l'acier AISI 4340 .....   | 33 |
| 3.3    CONDITIONS INITIALES ET CONDITIONS AUX LIMITES .....                                    | 46 |
| 3.4    SIMULATION 3D .....   | 48 |
| CHAPITRE 4 VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU modèle 3D.....  | 53 |
| 4.1    COMPARAISON POUR LA PROFONDEUR DURCIE ENTRE LA SIMULATION ET<br>L'EXPERIMENTATION ..... | 55 |
| 4.2    VALIDATION DU MODELE 3D.....  | 57 |
| 4.3    ANALYSE ANOVA ET DISCUSSION DES RESULTATS .....   | 60 |
| CHAPITRE 5 MODELISATION PREDICTIVE.....  | 67 |
| 5.1    INTRODUCTION.....   | 67 |
| 5.2    MODELISATION PAR RESEAUX DE NEURONES .....  | 68 |
| 5.3    ÉVALUATION DU MODELE.....   | 71 |
| 5.4    APPLICATION.....  | 73 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE.....   | 79 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....  | 82 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1: Composition chimique pour acier AISI 4340 [10] .....  | 35 |
| Tableau 2: Propriétés physico-chimiques de l'acier allié 4340 [10] .....                               | 36 |
| Tableau 3: Propriétés de base pour acier 4340 .....  | 37 |
| Tableau 4: Coefficient d'absorption, et Chaleur spécifique .....                                       | 37 |
| Tableau 5: Paramètres de base considérés comme principales propriété de l'acier 4340 .....             | 38 |
| Tableau 6: Intervalles de température utilisés pour la conductivité thermique .....                    | 38 |
| Tableau 7: Intervalles de température utilisés pour la résistivité de l'acier 4340 .....               | 39 |
| Tableau 8: Intervalles de la température utilisés pour la conductivité électrique .....                | 41 |
| Tableau 9: Intervalles de température utilisés pour la densité .....                                   | 42 |
| Tableau 10: Caractéristiques du maillage .....   | 43 |
| Tableau 11: Niveaux des paramètres P, V, w .....   | 50 |
| Tableau 12: Les tests de validation expérimentale .....  | 55 |
| Tableau 13: Planification expérimentale (orthogonal L27) .....   | 61 |
| Tableau 14: Analyse ANOVA pour la profondeur de trempe du sommet de la dent .....                      | 62 |
| Tableau 15: Analyse ANOVA pour la profondeur durcie au pied de la dent .....                           | 64 |
| Tableau 16: Facteurs et niveaux pour la modélisation et pour la validation .....                       | 73 |
| Tableau 17: Comparaison des performances du modèle en phase apprentissage et en phase prédiction ..... | 74 |



## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Diagramme de phase fer-carbone [4] .....  | 5  |
| Figure 2: Diagramme TTT d'un acier de type 4340 austénite, B = bainite, F = ferrite proeutectoïde, M = martensite, P = perlite (Tirée de Callister et Rethwisch (2008, p.424) ..... | 7  |
| Figure 3: Principe du traitement de surface [7] .....   | 10 |
| Figure 4: Profil de dureté pour différentes vitesses de balayage pour l'acier 4340 [13].....  | 13 |
| Figure 5: a) Dissolution de la perlite, b) l'homogénéisation de l'austénite [17] .....  | 27 |
| Figure 6: Profil de diffusion lors de l'homogénéisation [17] .....  | 29 |
| Figure 7: Caractéristiques dimensionnelles de l'engrenage .....   | 34 |
| Figure 8: Deux anneaux en aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> fixés les deux côtés de l'engrenage en acier 4340.....   | 35 |
| Figure 9: Intervalles de température utilisés pour la conductivité thermique.....   | 39 |
| Figure 10: Résistivité en fonction de la température .....  | 40 |
| Figure 11: Conductivité électrique en fonction de la température.....   | 40 |
| Figure 12: Densité dépendant de la température .....  | 41 |
| Figure 13: Maillage fin dans des parties spécifiques de l'engrenage.....  | 42 |
| Figure 14: Maillage pour les différentes parties de la pièce.....   | 43 |
| Figure 15: Analyse de maillage .....  | 44 |
| Figure 16: Analyse de la tolérance .....  | 45 |
| Figure 17: Isolation thermique des surfaces .....   | 46 |
| Figure 18: a) Représentation des surfaces transparentes réfléchissant le faisceau, b) et des surfaces qui absorbent le faisceau laser.....  | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 19: Contours isothermes pour $P = 2300 \text{ W}$ , $V = 0.45 \text{ mm / s}$ , $w = 3500 \text{ tr / min}$ , $T_0 = 753.15 \text{ K}$ .....                        | 48 |
| Figure 20: Courbes de dureté typiques au sommet de la dent d'engrenage en fonction des paramètres de processus $P$ et $V$ .....  | 49 |
| Figure 21: Courbes de dureté typiques au pied de la dent d'engrenage en fonction des paramètres de processus $P$ et $V$ .....  | 50 |
| Figure 22: Courbes de dureté typiques au sommet et au pied de la dent d'engrenage en fonction de paramètre de processus $w$ . $P=1900\text{W}$ , $V=0.25\text{mm/s}$ ..... | 51 |
| Figure 23: Ensemble d'engrenages : (a) Vue d'ensemble de l'ensemble d'engrenages et (b) ensemble d'anneaux en céramique [26] .....   | 54 |
| Figure 24: Comparaison de la profondeur durcie entre la simulation et l'expérimentation pour le test T4 .....  | 56 |
| Figure 25: Résultats de simulation pour les tests T8 et T3 .....   | 56 |
| Figure 26: Validations expérimentale de la profondeur durcie au sommet de la dent pour les tests T1, T4 et T9 .....  | 57 |
| Figure 27: Validations expérimentale de la profondeur durcie au pied de la dent pour les tests T1, T4 et T9 .....  | 58 |
| Figure 28: Validations expérimentale de la profondeur durcie au sommet de la dent pour les tests T3, T8 .....  | 58 |
| Figure 29: Validations expérimentale de la profondeur durcie au pied de la dent pour T3, T8 .....  | 59 |
| Figure 30: Effet des paramètres du processus de traitement sur la profondeur durcie au sommet de la dent .....   | 61 |
| Figure 31: Effet des paramètres du processus de traitement sur la profondeur durcie au pied de la dent .....   | 63 |
| Figure 32: Nature des erreurs en fonction de la complexité du procédé .....  | 68 |
| Figure 33: Structure générale d'un perceptron multicouche .....  | 70 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 34: Performances du modèle pour PDS lors la phase apprentissage..... | 75 |
| Figure 35: Performances du modèle pour PDP lors la phase apprentissage..... | 76 |
| Figure 36: Performances du modèle pour PDS lors la phase Validation.....    | 76 |
| Figure 37: Performances du modèle pour PDP lors la phase Validation.....    | 77 |
| Figure 38: Performances globales du modèle en phase apprentissage .....     | 77 |
| Figure 39: Performances globales du modèle en phase prédiction.....         | 78 |

## LISTE DES SYMBOLES

|            |  |
|------------|--|
| $A_{c_3}$  | Température d'austénitisation.                           |
| $A_{c_1}$  | Température eutectoïde.                                  |
| $C$        | Teneur en carbone de l'acier.                            |
| $C_c$      | Valeur critique de la composition du carbone.            |
| $C_e$      | Composition carbone Eutectoïde.                          |
| $C_f$      | Carbone dans la ferrite.                                 |
| $C_p$      | Chaleur spécifique.                                      |
| $D_0$      | Pré-exponentielle de diffusion du carbone.               |
| $f$        | Fraction volumique de martensite.                        |
| $f_m$      | Fraction volumique maximale de martensite.               |
| $f_i$      | Fraction volumique occupée par les colonies de perlites. |
| $g$        | Granulométrie moyenne.                                   |
| $HV$       | Dureté de Vickers (HV).                                  |
| $HRC$      | Dureté de Rockwell.                                      |
| $HV_m$     | Dureté de la martensite.                                 |
| $HV_{f+p}$ | Dureté de la ferrite plus la perlite.                    |
| $k$        | Conductivité thermique du matériau.                      |
| $P$        | Puissance laser.   |
| $Q$        | Énergie d'activation de la diffusion du carbone.         |
| $R_g$      | Constante de gaz.  |
| $R_c$      | Coefficient de réflexion du matériau.                    |
| $t$        | Temps.   |
| $T_0$      | Température de référence.                                |
| $V$        | Vitesse de déplacement du laser.                         |
| $\rho$     | Densité.   |

|               |   |
|---------------|---|
| $d_L$         | Diamètre de faisceau laser.                           |
| $\alpha$      | Orthonormé à la direction du faisceau laser.          |
| $I$           | Force cinétique.                                      |
| $T_p$         | Température maximale.                                 |
| $\tau$        | Constante de temps thermique.                         |
| $V_L$         | Vitesse laser.  |
| $V_r$         | Vitesse de refroidissement.                           |
| <b>res</b>    | Résistivité du matériau.                              |
| <b>sigma</b>  | Conductivité électrique.                              |
| <b>h</b>      | Coefficient d'échange thermique.                      |
| $T_{ref}$     | Température du milieu extérieur.                      |
| $\varepsilon$ | Émissivité de la surface.                             |
| $\sigma$      | Constante de Stefan-Boltzmann.                        |
| <b>MAE</b>    | Déviation moyenne absolue.                            |
| <b>MAPE</b>   | Pourcentage moyen de l'erreur absolue.                |
| <b>MSE</b>    | Erreur quadratique moyenne.                           |
| <b>RMSE</b>   | Racine de l'erreur quadratique moyenne.               |
| $R^2$         | Coefficient de détermination.                         |
| $A_c$         | Coefficient d'absorption de l'acier.                  |
| <b>PDS</b>    | Profondeur durcie au sommet de la dent.               |
| <b>PDP</b>    | Profondeur durcie au pied de la dent.                 |
| $O_j$         | Sortie du neurone courant $j$ .                       |
| $O_i$         | Sortie d'un neurone de la couche précédente $i$ .     |
| $\theta_j$    | Écart associé au neurone $j$ .                        |
| $W_{ij}$      | Poids de la connexion entre les neurones $i$ et $j$ . |
| $\nabla$      | Opérateur de Laplace.                                 |



# **CHAPITRE 1**

## **INTRODUCTION**

Depuis l'invention du premier laser en 1960, plusieurs industries se sont intéressées à cette technologie et ont cherché à tirer profit de ses avantages. Aujourd'hui, le laser est omniprésent dans notre vie quotidienne, son utilisation s'étend à une infinité d'applications et de nouvelles fonctions lui sont constamment attribuées. Ces dernières années, en se substituant aux procédés classiques de traitement thermique, le durcissement par transformation de surface par laser est devenu le procédé le plus utilisé dans les industries automobile et aéronautique. Dans ce type de procédé, l'interaction du laser avec le matériau produit un changement de phase sur la surface du matériau pour former une couche durcie, ce qui améliore la dureté de la surface et la résistance à l'usure du matériau. Les caractéristiques mécaniques de la zone durcie obtenue par traitement thermique au laser dépendent des propriétés physicochimiques du matériau à traiter et de plusieurs paramètres du procédé lui-même.

### **1.1 LASER**

Le laser est un acronyme anglais qui signifie « Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation » que l'on peut traduire par « amplification de lumière par émission stimulée de la radiation ». C'est l'une des plus grandes inventions du XXe siècle, qui est liée à la technologie informatique, à l'énergie atomique et à la technologie des semi-conducteurs. En mai 1960, Theodore Maiman [1], un scientifique du Hughes Laboratory en Californie, aux États - Unis a annoncé qu'il avait obtenu un laser solide impulsif à rubis d'une longueur d'onde de 0,6943 microns. C'était le premier laser jamais obtenu par l'humanité, et Maiman est devenu le premier au monde des scientifiques qui introduisent les

lasers dans des domaines pratiques. À l'heure actuelle, les lasers sont largement utilisés dans diverses industries en raison de leurs caractéristiques extrêmement avantageuses, notamment la découpe de la tôle, la fabrication industrielle, l'alimentaire et le médical, l'aérospatiale, etc. Avec le développement vigoureux de l'industrie manufacturière de haute technologie représentée par de nouveaux véhicules à énergie, la technologie laser a obtenu un espace de développement plus large.

### **1.1.1 Principe de fonctionnement de laser**

Le principe du laser repose sur trois phénomènes physiques décrivant l'interaction entre l'atome et la lumière. Le fonctionnement de laser peut se résumer en 3 principes [2]. Le premier principe est celui de l'absorption : les atomes absorbent les photons du rayonnement ciblé, et l'énergie de rayonnement absorbée élève les électrons d'orbites à basse énergie vers des orbites à haute énergie, et les atomes deviennent excités. Le deuxième principe est celui de l'émission spontanée : où les atomes excités émettent des ondes électromagnétiques en raison de la descente d'électrons d'orbites à haute énergie vers des orbites à basse énergie. Le troisième et dernier principe est celui de l'émission stimulée, où les atomes excités émettent des ondes électromagnétiques à la suite d'électrons descendant d'orbites à haute énergie vers des orbites à basse énergie. Le rayonnement induit émis par le matériau excité est appelé rayonnement cohérent car les ondes électromagnétiques produites par les électrons descendants ont une fréquence et une phase exactement égales à la fréquence et à la phase des ondes. Pour obtenir l'émission stimulée, il faut que les atomes soient dans un état excité. Pour cela, il faut leur transmettre de l'énergie sous forme de décharges électriques, cette action est appelée le pompage optique. Un résonateur optique est nécessaire pour accumuler l'énergie lumineuse dans le faisceau. Le résonateur est formé d'une paire de miroirs placés face à face de sorte que la lumière émise le long de la ligne entre les miroirs soit réfléchi d'avant en arrière. Lorsqu'une inversion de population est créée dans le milieu, la lumière réfléchi dans les deux sens augmente en intensité à chaque passage à travers le

milieu laser. D'autres lumières fuient autour des miroirs sans être amplifiées. Dans une cavité laser réelle, un ou les deux miroirs transmettent une fraction de la lumière incidente. La fraction de lumière transmise, c'est-à-dire le faisceau laser, dépend du type de laser. Si le laser génère un faisceau continu, la quantité de lumière ajoutée par émission stimulée à chaque aller-retour entre les miroirs est égale à la lumière émergeant dans le faisceau plus les pertes dans le résonateur optique.

### 1.1.2 Types de laser

Le laser industriel peut fonctionner en mode continu (CW) ou pulsé. On dit qu'une mode est continue si sa durée dépasse 0.25 seconde, alors que les modes pulsés durent entre 10-15 ms. Le mode est choisi en fonction de l'application (marquage, découpe, traitement thermique, soudage) et des matériaux (métaux, plastiques, organiques).

Il existe plusieurs types de lasers : les lasers à gaz, à solide, à liquide et les semi-conducteurs notamment. Ces différents types de laser utilisent tous le même principe général de fonctionnement, seul le milieu amplificateur varie à chaque fois [3].

#### a) **Laser à solide** :(Nd : YAG, Er : YAG, Rubis, Saphir, Alexandrite).

Le milieu amplificateur est un solide. Cela peut être une pierre précieuse telle que le rubis ou le saphir, ou encore du verre. Ce n'est pas le solide qui est à l'origine du faisceau. Il permet uniquement de contenir des ions métalliques (atome ayant gagné ou perdu un ou plusieurs électrons) insérés à l'intérieur, comme le néodyme ou, pour le laser de Maiman, les ions chrome. Selon la nature du cristal (couleur, densité...), on peut modifier les longueurs d'onde émises. Le laser Nd-YAG, par exemple, est constitué de grenat d'yttrium et d'aluminium et dopé au néodyme. La longueur d'onde émise par ce laser est de 1064 nm et sa puissance varie de quelques watts à plusieurs kilowatts.

De tous les lasers, ce sont ceux qui fournissent la plus grande puissance. Ils fonctionnent généralement en mode discontinu, c'est à dire que les impulsions lumineuses sont extrêmement brèves.

**b) Laser à gaz**

Les Lasers à milieu actif gazeux émettent une longueur d'onde invisible, et peuvent se classer en deux catégories :

- Des lasers à fonctionnement simple, tels que les lasers krypton (Kr).
- Des lasers à fonctionnement plus complexes, tel que le laser à Hélium-Néon (He-Ne).

**c) Lasers semi-conducteurs :** les lasers semi-conducteurs tels que les lasers à diodes sont principalement utilisés dans le secteur de télécommunication.

**d) Laser à liquide :** Pour les lasers à liquide, le milieu amplificateur est composé d'un ou plusieurs colorants chimiques présents dans un liquide. Grâce à ces colorants, il est possible de faire varier la longueur d'onde du faisceau laser en faisant varier leur concentration. Ils ne sont utilisés qu'en mode continu et sont souvent appliqués dans les recherches biomédicales.

## 1.2 TRAITEMENT THERMIQUE DES MATÉRIAUX

Traditionnellement, les métaux sont divisés en deux grands groupes : ferreux et non ferreux. Les métaux ferreux comprennent le fer et ses alliages (acier, fonte et ferroalliages). Les alliages présentant une grande variété de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques. L'acier est un alliage de fer avec du carbone. La proportion de fer dans l'alliage est de 90% à 98,5% et la proportion de carbone ne dépasse pas 2,14%. La composition de l'acier comprend d'autres éléments chimiques, soit contenus dans le minerai (silicium, manganèse, phosphore, soufre), soit introduits spécifiquement pour l'amélioration des propriétés (nickel, vanadium, chrome, molybdène). Par rapport à la fonte, l'acier a de meilleures propriétés mécaniques en raison de la faible concentration de carbone et d'impuretés normales. L'acier présente plusieurs phases solides (ferrite, perlite, cémentite, austénite) avec des températures de changement de phase ou d'états variables selon la teneur en carbone. La figure 1, montre les frontières entre les différentes phases et états de l'acier.

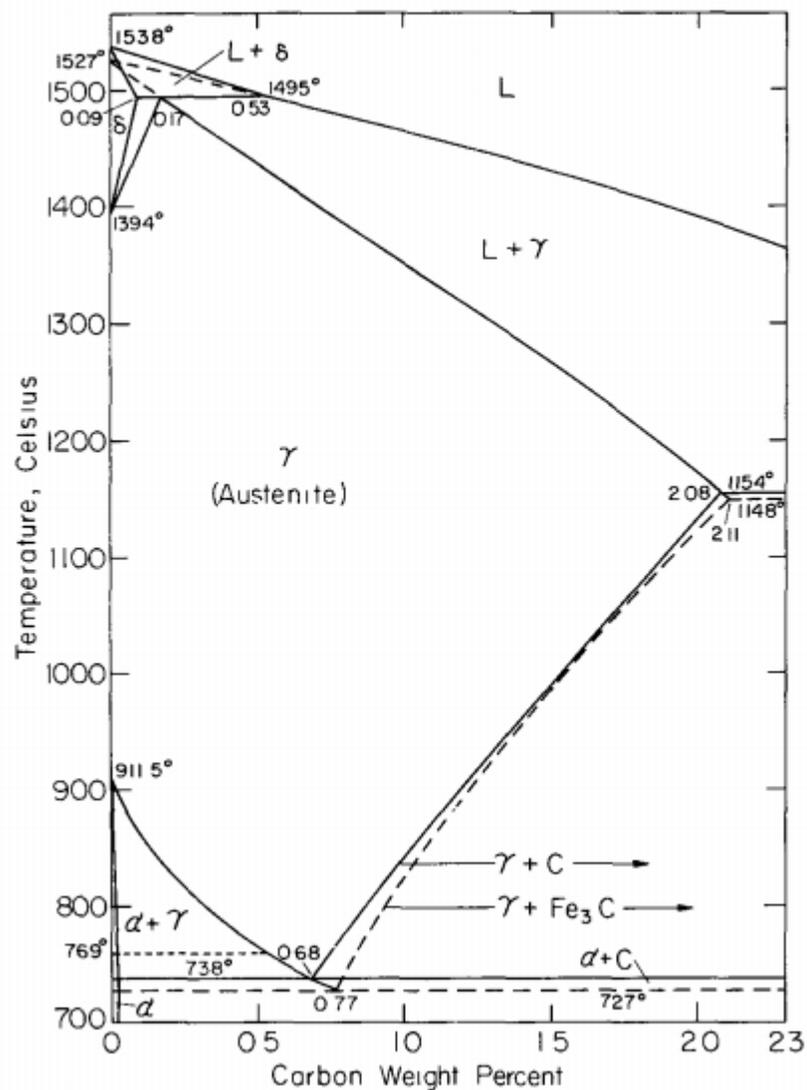


Figure 1: Diagramme de phase fer-carbone [4]

L'acier 4340 est un acier hypo-eutectoïde avec une teneur en carbone (C) de 0,43 % environ. Utilisé dans la plupart des secteurs industriels pour des applications nécessitant des contraintes de traction plus élevées telles que les arbres, engrenages, axes, broches, etc. L'acier 4340 est connu pour sa ténacité et sa capacité à atteindre des résistances élevées à l'état traité thermiquement. Il se caractérise par une limite d'élasticité plus élevée. Pour réaliser le traitement thermique d'un acier, il est d'abord nécessaire de le chauffer jusqu'à la

température d'austénisation (environ 1073 K), de façon à être complètement dans le domaine austénitique [5].

### 1.3 TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS

Le traitement thermique est un processus technologique qui consiste en un ensemble d'opérations de chauffage, de maintien et de refroidissement de produits en métaux et alliages, dont le but est de modifier leur structure et leurs propriétés dans une direction donnée. Le traitement thermique examine et explique le changement dans la structure et les propriétés des métaux et alliages sous exposition thermique, ainsi que sous exposition thermique en combinaison avec des effets chimiques, magnétiques et autres.

L'objectif principal du traitement thermique des aciers à carbone est d'améliorer leur dureté et leur résistance à la corrosion. En termes simples, ce processus consiste à chauffer le métal à une température supérieure à celle de l'austénisation, de sorte que la structure naturelle de l'austénite se forme dans la structure du réseau cristallin. Puis la trempe du métal à cet état.

Afin de permettre une bonne homogénéisation de l'austénite et la dissolution des carbures, il est nécessaire d'avoir un maintien en température suffisante. Le maintien ne doit pas être non plus trop long pour éviter le grossissement des grains austénitiques. Lors du refroidissement, des nouvelles phases peuvent apparaître, et ces phases sont métastables. Ces phases ne sont pas représentées dans le diagramme de phase (voir figure 1), car ce dernier représente l'état d'équilibre de l'alliage. Sur le diagramme représenté sur la figure 2, on peut observer les différentes phases selon les conditions de trempe pour l'acier 4340, soit l'austénite, la bainite, la perlite, ou la ferrite. Si le refroidissement est très rapide, l'austénite se transforme en martensite dure.

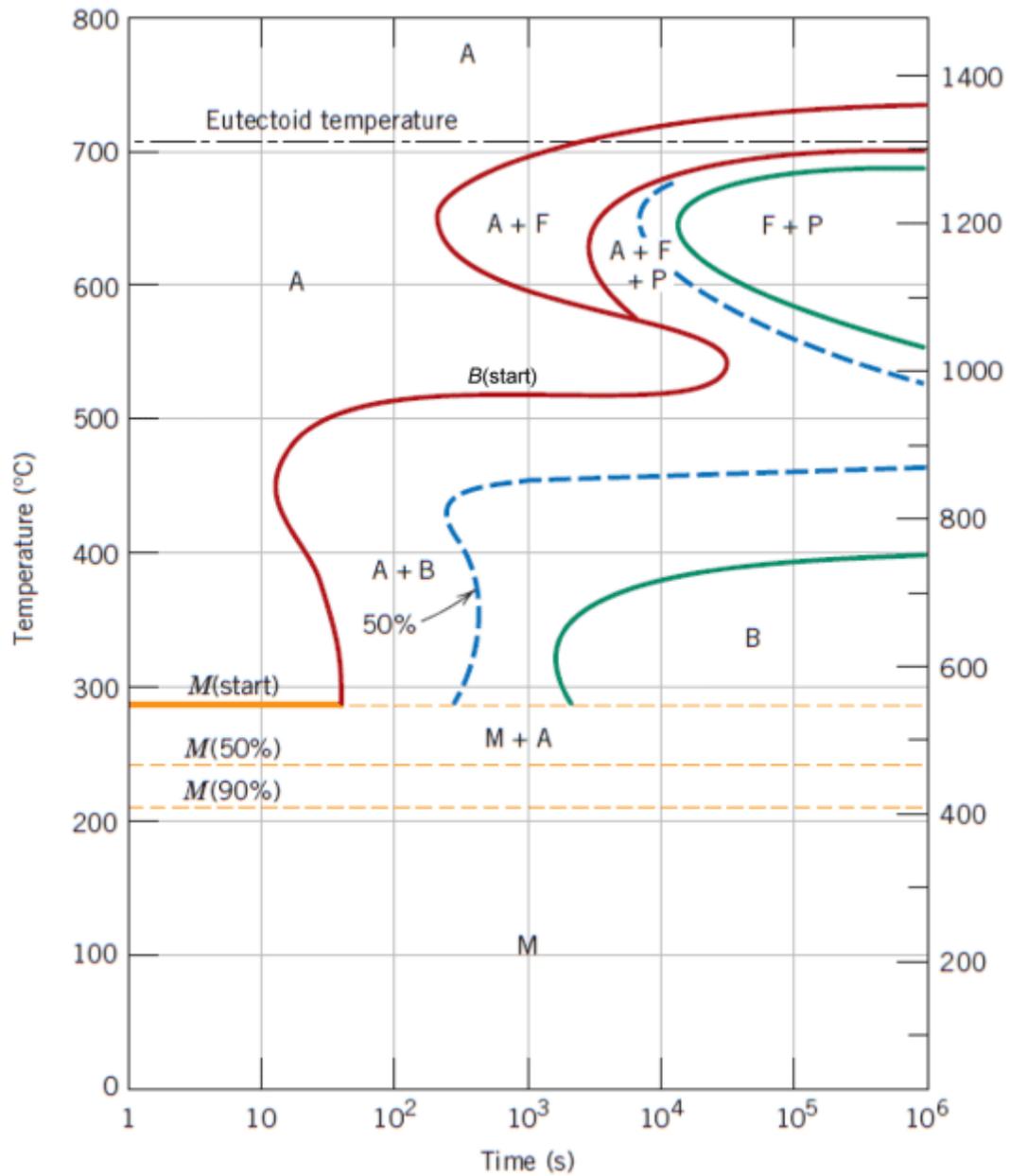


Figure 2: Diagramme TTT d'un acier de type 4340 austénite, B = bainite, F = ferrite proeutectoïde, M = martensite, P = perlite (Tirée de Callister et Rethwisch (2008, p.424))

### 1.3.1 L'austénisation

Elle consiste à mettre en solution tout le carbone présent dans l'alliage, la solubilité du carbone dans l'austénite est limitée à 2.1% et seulement à 0.02% dans la ferrite. Donc, il est obligatoire de choisir une température assez élevée afin de mettre en solution tout le carbone au cours de la transformation de la phase ferritique en austénite. La croissance de l'austénite est alors contrôlée par la diffusion du carbone.

Deux températures définissent les transformations dans l'acier : Ac1 et Ac3. Ce sont respectivement les températures de début et de fin de formation de l'austénite. Pour austéniser l'acier, il est nécessaire de dépasser la température Ac3 au cours du traitement thermique. En général, une température  $A3 + (25 \text{ à } 50 \text{ }^\circ\text{C})$  est choisie.

Lors de refroidissement rapide (au-delà de la vitesse critique de trempe), les atomes de carbone en solution dans le fer  $\gamma$  n'ont pas le temps de diffuser, ce qui permettrait l'apparition de ferrite et de cémentite. Ils restent donc prisonniers dans le fer  $\alpha$ . Il y a apparition de martensite qui est une solution sursaturée de carbone dans le fer  $\alpha$ . Cette sursaturation provoque une déformation du réseau cristallin par cisaillement du réseau d'austénite. Il s'ensuit l'apparition de fortes contraintes qui produisent l'augmentation de la dureté.

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations successives ayant pour but :

1. D'améliorer de la résistance à la rupture et de la limite élastique).
2. D'augmenter de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
3. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
4. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

#### 1.4 TRAITEMENT THERMIQUE DE SURFACE AU LASER

Le traitement de surface est un sujet de grande importance à l'heure actuelle. Ce procédé offre la possibilité de fournir des composants améliorés avec des surfaces aux propriétés améliorées, car seules certaines parties des surfaces sont sujettes à l'usure ou à la corrosion. Il n'est donc pas nécessaire de traiter toutes les parties de la pièce. Les procédés de traitement thermique conventionnels tels que (durcissement à la flamme, durcissement par induction, etc..) possèdent plusieurs limitations, c'est-à-dire une consommation élevée en temps et en énergie, un programme de traitement thermique complexe, une zone affectée par la chaleur plus large, un manque de limite de solubilité solide et une cinétique plus lente. De plus, ces procédés ne sont pas respectueux à l'environnement [6].

Au cours des dernières années, avec le développement continu de l'économie sociale, diverses industries ont commencé à se développer et le traitement thermique au laser est devenu de plus en plus important dans notre vie quotidienne. En fait, le traitement thermique de surface au laser est une sorte de technologie de traitement thermique, qui utilise des faisceaux laser à haute énergie pour balayer rapidement la pièce finie ou à usiner (voir figure 3), de sorte que la température de surface de l'alliage dépasse rapidement le point de transition de phase. Lorsque le faisceau laser quitte la pièce irradiée, en raison de la conductivité thermique pendant le refroidissement rapide, une structure de couche de traitement plus fine est obtenue. Cette couche est généralement à une dureté généralement supérieure à celle de la trempe conventionnelle [3].

Dans le traitement thermique de surface au laser, la conversion de la martensite se fait par refroidissement spontané, ce qui signifie qu'après la réaction avec le faisceau laser, la chaleur se transfère très rapidement à la surface de la pièce. La quantité d'énergie qui peut être transférée par le faisceau laser dépend fortement de l'absorption du métal. Il existe une relation entre l'absorption du faisceau laser à la surface d'un matériau métallique, la température et la densité d'énergie [8].

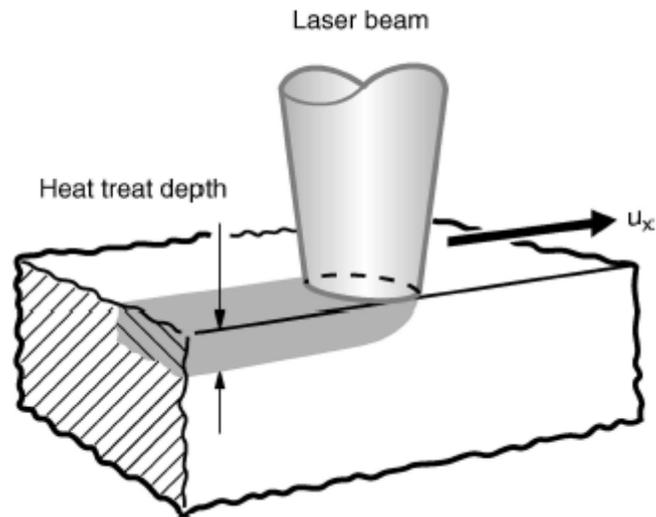


Figure 3: Principe du traitement de surface [7]

L'absorption dépend du type de matériau, de la teneur en carbone, de la microstructure, des conditions de surface, de la taille et de la géométrie, et est généralement limitée à la couche superficielle. Un dispositif de mise en forme de faisceau peut être utilisé pour contrôler la zone de chauffage. Par conséquent, le traitement thermique au laser offre aux fabricants un processus précis et contrôlé pour modifier leurs outillages et équipements, améliorant ainsi leur résistance à l'usure. La plupart des lasers peuvent être utilisés pour la trempe, car le paramètre principal requis pour tremper le matériau à une profondeur et une dureté spécifiée est la puissance du laser. Le laser Nd-YAG est utilisé avec une longueur d'onde de 0,2 à 10,6  $\mu\text{m}$ . L'avantage de ces sources est qu'en plus de la longueur d'onde nettement plus faible, leur diamètre focal est plus petit et l'absorption est beaucoup plus élevée que les autres sources laser [9].

La réflectivité élevée du faisceau laser lorsqu'il est utilisé sur les métaux est un inconvénient majeur du traitement de surface au laser. Le préchauffage des pièces à usiner fait partie des techniques couramment utilisées pour améliorer l'absorption des matériaux réfléchissants pour un traitement efficace, car l'absorbance d'un matériau augmente avec une augmentation de sa température [8].

Les principaux avantages du traitement thermique de surface au laser [8] :

- Chauffage et refroidissement rapides.
- La zone thermiquement affectée qui en résulte est minime, comparée à celle associée au durcissement à la flamme et par induction.
- Profil de Dureté plus uniforme.
- Distorsion minimale.
- Facilité de traitement de formes complexes grâce à la possibilité de scanner le faisceau sur la pièce.
- Aucune extinction externe n'est nécessaire car le processus implique souvent une auto-extinction.
- Le temps de cycle court se traduit par une structure à grain relativement fin. Cela permet une plus grande résistance et une bonne résistance à la fatigue à atteindre.

Malgré ces avantages de cette technologie, il existe certains inconvénients, notamment le coût d'investissement élevé du laser, et l'apparition des points faibles dans la zone de durcissement de certains métaux en raison des temps de réaction courts.

### **1.5 DURCISSEMENT PAR TRANSFORMATION DE SURFACE AU LASER**

Depuis l'avènement des lasers en 1960, la technologie laser, en tant que technologie de pointe dans le traitement des matériaux, a obtenu des applications importantes dans de nombreuses industries. Le traitement au laser n'est plus seulement une expérience scientifique et est entré dans le domaine de la production industrielle, tels que le durcissement par transformation de phase appliquée à la surface des matériaux en acier qui est devenu un domaine de recherche très actif. Les recherches dans ce domaine n'ont jamais été interrompues depuis l'étude du durcissement par transformation de surface par laser de la fonte au début des années 1970. Le traitement de surface au laser peut non seulement

modifier la microstructure du matériau à sa surface grâce au durcissement par changement de phase, mais également modifier la composition et la microstructure de la surface des pièces [2].

La technologie de durcissement par transformation de surface laser est une technologie de pointe qui permet d'obtenir localement une dureté et une résistance plus élevées sur des surfaces discrètes. Dans le cas de durcissement par transformation de surface par laser, l'interaction du laser avec le matériau produit un changement de phase sur la surface du matériau pour former une couche durcie, ce qui améliore la dureté de la surface et la résistance à l'usure du matériau [7].

### **1.5.1 Principe de durcissement par transformation de surface par laser**

Le traitement au laser consiste à exposer la surface du matériau à un cycle thermique de chauffage suivi d'un refroidissement rapide, les vitesses de refroidissement pouvant atteindre  $10^7$  °C/s et à produire des cycles de localisation relativement courts (de l'ordre de 0.01 à 1.0 s) [10].

Ce processus est influencé par la combinaison de plusieurs paramètres, notamment la température, les propriétés chimiques et thermophysiques du matériau, la taille géométrique de l'échantillon et l'état de surface, ainsi que la vitesse de chauffage et du refroidissement rapide du laser. Au cours du refroidissement laser, la chaleur est transférée par conduction, convection et rayonnement [11]. Il est nécessaire de développer une stratégie globale pour contrôler le processus de chauffage si nous voulons avoir une structure martensite spécifique.

Les propriétés thermophysiques du matériau et les paramètres du système de chauffage ont des effets significatifs [12]. Les principaux paramètres du processus sont la puissance du laser, la vitesse de balayage, la taille du spot du faisceau, la distance focale et la vitesse de rotation pour les pièces rotatives [8, 10, 13]. L'effet global de ces paramètres reflète directement la température du processus de trempe laser, ces paramètres peuvent se compenser et l'effet de durcissement similaire peut être obtenu après une sélection et un

réglage approprié. De plus, la plage de sélection de chaque valeur de paramètre doit être prise en compte, elle ne doit pas être trop grande ou trop petite, afin d'éviter que la vitesse de refroidissement ne soit trop faible et que la transformation de martensite ne puisse pas être réalisée [8]. Par exemple, Une réduction de la vitesse de balayage réduit la dureté de la surface, mais augmente la profondeur de la zone durcie (voir figure 4). Ceci est dû au fait que la réduction de la vitesse de balayage augmente la température de surface et le temps de réaction pour l'austénitisation, ce qui entraîne une plus grande taille moyenne de grain d'austénite.

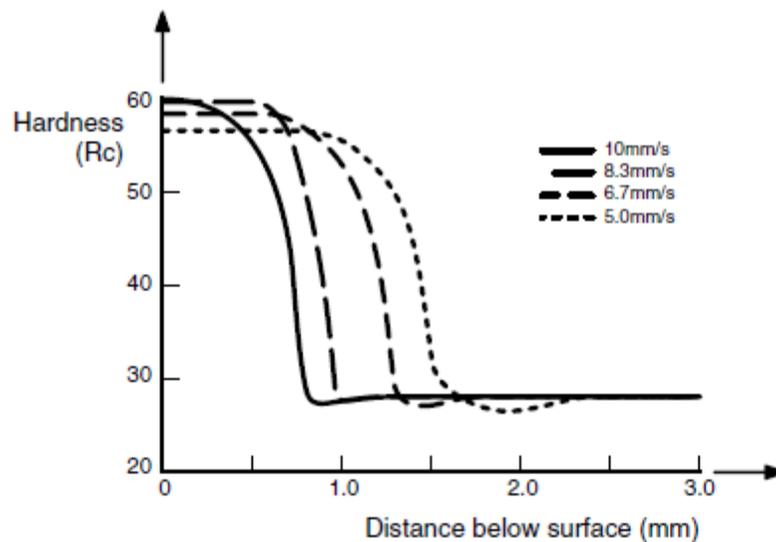


Figure 4: Profil de dureté pour différentes vitesses de balayage pour l'acier 4340 [13]

Le durcissement par transformation de surface au laser présente des avantages uniques:

1. La structure de la couche durcie est affinée et la dureté est de 15% à 20% supérieure à celle de la trempe conventionnelle. La résistance à l'usure des matériaux en fonte après la trempe au laser peut être augmentée de 3 à 4 fois.
2. Les matériaux bon marché peuvent être durcis par changement de phase au laser pour remplacer des processus complexes tels que la carburation et le dépôt en phase vapeur.

3. La surface partielle de la pièce peut être chauffée et trempée, et la couche durcie peut être contrôlée avec précision.
4. La pièce a peu de déformation après la trempe au laser et présente presque aucune oxydation. Le phénomène de diffusion du carbone, tant qu'il ne fond pas, n'a pas beaucoup d'influence sur la rugosité de surface de la pièce et peut devenir le processus final du traitement de la pièce.
5. Pour les parties spéciales de la pièce, telles que les parois de rainure, les trous borgnes, les trous profonds et la paroi intérieure de la cavité peuvent être traitées, à condition que la pièce qui peut être irradiée par le faisceau laser.
6. Des vitesses de traitement extrêmement élevées ( $104 \sim 106 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$  pour le chauffage) et ( $106\text{-}108 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$  pour le refroidissement), par rapport au chauffage par induction.
7. Le taux de production est élevé, le processus est facile à réaliser, le contrôle par ordinateur et le degré d'automatisation est important.

## **1.6 DURCISSEMENT DE SURFACE PAR LASER APPLIQUÉ À DES GÉOMÉTRIES COMPLEXES**

Le durcissement de surface par laser offre la possibilité de localiser la zone de travail sans échauffement total des pièces, et la possibilité d'obtenir un niveau de propriétés plus élevé en raison des vitesses de chauffage et des vitesses de refroidissement très élevées de la zone d'exposition au faisceau laser. La capacité à entrer de l'énergie à des doses précises permet au processus de durcissement au laser d'être effectué sans perturber la micrométrie de surface, ce qui à son tour permet l'utilisation du durcissement au laser comme processus final. Cette circonstance rend intéressante l'utilisation de cette technique pour renforcer des surfaces de forme complexe [14].

Pendant le processus de durcissement de l'engrenage laser, la zone de chauffage peut être divisée en trois couches : supérieure, moyenne et inférieure. La couche supérieure est la couche de surface à haute température, la couche intermédiaire est la couche de transition et

la couche inférieure est la couche froide. Le refroidissement passe de la couche inférieure à la couche supérieure étape par étape, et la chaleur de la couche de surface est exportée à travers le matériau, et la vitesse de refroidissement détermine le pourcentage de la teneur en martensite après le refroidissement, Les paramètres du processus laser peuvent être ajustés pour obtenir dureté idéale et une structure martensite à grains fins [8].

Le durcissement par transformation au laser, offre la possibilité de traiter les surfaces afin de renforcer localement les zones sujettes à la fissuration par fatigue. L'absorption d'énergie laser dépend de nombreux paramètres, par exemple, la structure de surface et l'orientation de la surface. L'angle d'incidence du faisceau laser aussi joue un rôle clé à cet égard [8, 14]. Lorsque des géométries complexes telles que des engrenages sont traitées, la surface ne peut pas être considérée comme une série de surfaces planes. Évidemment, cela conduit à des degrés d'absorption d'énergie localement variables. Une analyse complète par Altergott et Patel [15], après un durcissement appliqué à des pignons, ils ont souligné la nécessité d'appliquer des normes de fonctionnement différentes en fonction des parties de la dent à traiter, car la quantité du matériau au sommet de la dent est beaucoup plus petite que la quantité dans la racine et en pied de la dent.

Une attention particulière doit être portée au profil de dureté souhaité pour différentes régions de la dent d'engrenage. En effet, les engrenages sont souvent trempés en surface pour augmenter leur résistance à l'usure et à la fatigue.

L'épaisseur de la couche durcie doit être suffisamment profonde pour supporter la contrainte maximale sur l'engrenage sans affecter le reste de la dent. Cependant, une profondeur de trempage excessive laisse la dent trop fragile pour résister aux efforts de traction. Le profil de dureté uniforme est populaire pour les engrenages de taille moyenne. Comme les dents d'engrenage ne sont pas complètement trempées, un noyau relativement ductile (35 à 45 HRC) combiné à une surface dure (55 à 65 HRC) offre des propriétés d'engrenage très remarquables, telles qu'une excellente résistance à l'usure, la ténacité et la résistance à la flexion, et permet une plus grande durabilité des engrenages [10, 16].

En 1985, Benedict et Eskilsen [11] ont présenté une étude des petites roues dentées. Par le balayage, d'une pointe de dent à l'autre, en modifiant l'angle d'incidence, la force et le temps de réaction (vitesse de progression) en fonction des pièces traitées. A. Borki et al. [10] ont présenté une étude expérimentale du durcissement de surface au laser pour un engrenage en acier faiblement allié AISI 4340 avec 48 dents et un diamètre extérieur de 105 mm, en utilisant un système laser Nd : YAG (3 kW). L'engrenage est monté sur un arbre tournant à une vitesse (3000-4000 tr/min). Ils ont étudié l'effet de la puissance du laser, la vitesse de balayage et la vitesse de rotation sur le profil de dureté et la profondeur de durcissement. Les résultats ont montré une forte corrélation entre les profondeurs durcies en haut au pied des dents.

## **1.7 PROBLÉMATIQUE**

L'amélioration des performances des engrenage par durcissement de surface est une application industrielle prometteuse ayant un potentiel majeur. Ce traitement de surface permet d'améliorer la dureté des dents, leur résistance à la fatigue et à l'usure et une augmentation importante de leur durée de vie. Cependant, le processus qui conduit à ce traitement se caractérise par le fait qu'il est affecté par de nombreux paramètres surtout dans le cas du traitement de pièces mécaniques de formes géométriques complexes telle que les engrenages. Dans ce cas, le processus de durcissement est relativement difficile à contrôler. Chaque paramètre doit être géré de manière à assurer la stabilité et la reproductibilité du processus de durcissement. La performance du traitement est fortement influencée par des facteurs relevant à la fois des caractéristiques dimensionnelles et géométriques de la pièce à traiter, des propriétés thermo-physiques du matériau et des paramètres du processus de traitement. Le contrôle de la profondeur de durcissement nécessite donc un contrôle soigné de l'ensemble de ces facteurs. Le développement d'approches structurées et efficaces permettant d'identifier les conditions pouvant conduire à la profondeur durcie désirée est nécessaire. L'identification de ces conditions en se basant sur des approches expérimentales

peut s'avérer long et très coûteux. Le développement d'une stratégie prédictive économiquement fiable représente un intérêt majeur pour l'industrie. La disponibilité de modèles prédictifs permet également de réaliser des analyses approfondies sur les effets de chaque paramètre et sur sa contribution dans la variation du profil de dureté et de la profondeur durcie afin de mieux comprendre le comportement du procédé de traitement notamment dans des conditions difficiles à réaliser expérimentalement.

Ashby et Easterling [17] et Li et al.[18] ont développé des modèles de transformation de phase pour les aciers dans des conditions normalisées et ont examiné l'effet de plusieurs variables de processus sur la profondeur durcie. Ils ont utilisé l'analyse thermique pour obtenir les profils de température et appliquer les équations cinétiques décrivant les changements microstructuraux. Plus tard, ce modèle a été étendu par Shercliff et Ashby [12] en utilisant des relations dimensionnelles entre diverses variables de processus pour créer des diagrammes de traitement afin de déterminer la profondeur durcie pour le cas des sources laser gaussiennes et rectangulaires. Les deux modèles constituent la base de nombreuses recherches ultérieures menées par de nombreux chercheurs.

En 1986, un modèle thermique / cinétique pour le durcissement laser d'une pièce rectangulaire en acier a été développé par Davis et al.[19]. Le modèle comprenant des transformations de phase métallurgiques est basé sur les travaux d'Ashby et Easterling [17]. Ils ont considéré chacune des conditions requises pour le durcissement par transformation de surface dans leur analyse, à savoir, (i) le matériau doit atteindre la température A3 de l'acier pour l'austénitisation, (ii) il doit rester au-dessus de cette température pendant un temps suffisant pour que la diffusion du carbone puisse avoir lieu (le temps nécessaire à la diffusion du carbone pour avoir lieu est estimé à 0,003 s), et (iii) il doit ensuite être éteint pour transformer rapidement l'austénite en martensite (la vitesse de refroidissement de  $\sim 103 \text{ C/s}$ ). Les prédictions de ce modèle ont été comparées aux résultats d'expériences sur l'acier En8, et se sont avérées bien concordantes.

Le processus de durcissement par transformation de surface au laser peut être contrôlé par ordinateur ou contrôlé numériquement. Les modèles numériques constituent un outil

puissant non seulement pour prédire les paramètres expérimentaux les plus pratiques, mais aussi pour fournir une vue plus complète du processus laser. La simulation joue un rôle important dans le réglage et l'optimisation du processus, ce qui réduit considérablement les essais et les erreurs chaque fois qu'il y a un grand changement de paramètre tel que le matériau, le diamètre de la pièce à usiner, la profondeur trempée, etc.

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles de prédiction à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) dans le but d'établir une relation entre les paramètres de traitement laser et la température, qui est la principale variable liée aux transformations de phase et la dureté. En 2006, T. Miokovic et al.[20] ont développé un mode numérique à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) pour une géométrie complexe en acier AISI 4140, un modèle mathématique a été utilisé avec succès, celui-ci inclut l'effet de l'homogénéité de l'austénite sur la cinétique de la transformation de la martensite lors du refroidissement.

Selon Borki et al [10], pour les pièces rotatives, les principaux paramètres du processus sont la puissance du laser, la vitesse de balayage, la taille du spot du faisceau, la distance focale et la vitesse de rotation car l'effet de ces paramètres sur la profondeur durcie est clairement établi. Une autres étude sur la modélisation du processus de durcissement au laser a été faite par Patwa et Shin [21]. Le modèle développé combine une solution numérique transitoire tridimensionnelle pour un cylindre rotatif soumis à un chauffage par un faisceau laser en translation, avec un modèle cinétique pour prédire la structure et la dureté près de la surface. Le modèle est capable de prédire une profondeur de 0,54 mm avec une dureté de 63 HRC. Avec une puissance laser (diode) de 500 W et une vitesse de rotation de 6 tr / min.

Un modèle thermique 3D transitoire a été développé par Leonardo Orazi et al.[22]. Ce modèle a été validé par des tests expérimentaux sur des cylindres de diamètre 20 et 30 mm en acier 1040. Les résultats montrent que pour une vitesse de rotation de 1140 tr / min, une puissance de 1 kW, une vitesse de balayage de 30 mm / min, il en résulte une dureté de 690 HV.

En 2006, Skvarenina et Shin [16] ont utilisé des approches expérimentales et numériques pour étudier la dureté de surface et la profondeur de durcissement. Un modèle thermique tridimensionnel a été utilisé pour prédire la distribution de température sur la pièce à traiter. Ce modèle, basé sur le travail effectué par Ashby et Easterling [17], prédit avec succès et les résultats atteints expérimentalement, soit une profondeur de 2,5 mm avec une dureté uniforme de 57 HRC sur un cylindre en acier AISI 1536, de 60 mm de diamètre, une vitesse de balayage de 2,9 mm / s, une puissance de 1220 W et une vitesse de rotation de 1 tr/min. M.J. Tobar et al.[23] ont développé un modèle numérique 3D, qui comprend un modèle transitoire 3D analytique qui fournit des informations sur l'ensemble du champ de paramètres pour le traitement afin d'obtenir les conditions les plus favorables, et un modèle FEM numérique qui permet une étude et une optimisation plus détaillées sur la plage de paramètres sélectionnée basés sur la solution d'une équation de conduction thermique transitoire. Ils ont appliqué la méthodologie décrite dans ce travail pour améliorer les coefficients de dureté de travail des aciers inoxydables AISI H13. Le profil de dureté selon le modèle FEM finalement comparé aux mesures expérimentales. Les résultats montrent des capacités prédictives fascinantes du modèle proposé.

Concernant, les pièces de géométries complexes tels que les engrenages, Pretorius et Vollertsen [23] ont modélisé une forme de traitement thermique au laser sur une roue dentée, où le traitement était appliqué uniquement dans la racine de la dent. Le modèle numérique 3D a été développé à l'aide du logiciel SYSWELD et consistait à modéliser le flux thermique, les transformations métallurgiques et géométriques. Dans une autre étude, Zhang et al.[24] ont traité au laser des pignons de 98 mm de diamètre extérieur, avec 23 dents, installés sur un support permettant de déplacer latéralement la roue et de la mettre en rotation. Les résultats ont été très concluants, la profondeur durcie des flancs était d'une épaisseur relativement uniforme. Cependant, aucune modélisation de processus n'a été présentée. Une simulation à l'aide de logiciel Comsol a été présentée par Hadhri et al. [25]. Un modèle 3D de prédiction du profil de dureté a été développé à l'aide de la méthode des éléments finis. Le modèle a été validé par l'expérimentation. Les tests expérimentaux sont faits sur un arbre canulé en acier AISI 4340 grâce à un système laser Nd : Yag commercial

de 3 kW. Le modèle est utilisé pour estimer la distribution de température et les propriétés du profil de dureté pour divers paramètres de processus et propriétés des matériaux. Les résultats montrent un grand accord entre les valeurs attendues et les valeurs mesurées pour les dimensions de l'écrouissage. Les résultats révèlent que le modèle peut non seulement fournir une prédiction stable et précise de la distribution de température et des propriétés du profil de dureté sous des paramètres et des conditions de traitement variables, mais également une analyse complète des effets des paramètres du processus.

Billaud et al. [26] ont développé une approche qui examine les effets des paramètres de traitement laser communément connus sur les propriétés des surfaces traitées, telles que la puissance du laser, le diamètre de focalisation du faisceau laser, la vitesse de balayage et la vitesse de rotation pour un engrenage. Dans cette étude, l'engrenage est en acier 4340 faiblement allié avec 48 dents. L'engrenage a un diamètre extérieur de 105 mm et une largeur de 7 mm. Afin de simuler le processus de chauffage en utilisant la méthode des éléments finis. Le faisceau laser Nd : YAG est simulé à une source de chaleur avec une distribution gaussienne. La largeur et la profondeur de la zone durcie sous la surface peuvent être déterminées à l'aide des équations métallurgiques d'Ashby et Easterling [17]. Les résultats démontrent que la simulation numérique peut effectivement conduire à un modèle cohérent capable de fournir avec précision et fiabilité une prédiction appropriée des caractéristiques de surface durcie des dents d'engrenage sous des paramètres de durcissement variables, sans nécessiter une procédure d'essai /erreur qui s'avère lente et coûteuse. Bien que la modélisation soit longue à mettre en œuvre à cause du nombre important de paramètres, le modèle s'avère étonnamment précis et robuste démontrant une concordance remarquable entre les prédictions et les mesures expérimentales.

Une étude expérimentale du durcissement de surface par laser pour un engrenage à l'aide d'une analyse de régression mettant l'accent sur les effets de différents paramètres du processus sur le profil de dureté et sur la variation de la profondeur de durcissement a été réalisé par Borki et al. [10]. Les expériences ont été réalisées sur des engrenages droits en acier 4340 de 105 mm de diamètre en utilisant un système laser Nd : YAG commercial de 3

kW. La puissance du laser, la vitesse de balayage et la vitesse de rotation sont utilisés comme paramètres permettant d'évaluer le contraste de la profondeur de durcissement et de déterminer une éventuelle relation entre ces paramètres et les propriétés physiques et techniques de la région durcie.

## **1.8 OBJECTIFS**

L'objectif principal de ce travail est de développer un modèle capable de prédire le profil de dureté et la profondeur durcie sur un engrenage en acier 4340 ayant subi un traitement thermique de surface par laser. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés par Borki et al. [10]. Plus spécifiquement, il s'agit de (i) développer un modèle numérique capable de simuler le comportement du procédé et de le valider expérimentalement, (ii) de conduire des simulations selon une planification structurée dans le but de mener une analyse statistique approfondie des effets de chaque paramètre du procédé et de sa contribution dans la variation du profil de dureté et de la profondeur durcie, (iii) de générer la base de données nécessaire à l'établissement du modèle prédictif et (iv) de développer et tester le modèle prédictif.

## **1.9 MÉTHODOLOGIE**

Dans les procédés de traitement thermique au laser, il est important de comprendre les relations de cause à effet entre les différents paramètres du processus et le profil de dureté. Ces relations constituent un des ingrédients de base du développement du modèle de prédiction de la profondeur de durcissement et de l'évaluation de l'influence que peuvent avoir les paramètres de processus sur la zone durcie. La précision, la rapidité et la robustesse sont les principaux critères à considérer pour l'évaluation d'un tel modèle. Les réseaux de neurones artificiels, connus pour leur robustesse et leur rapidité de calcul s'avèrent une

alternative judicieuse. Cependant, pour être en mesure d'élaborer un tel modèle, il est nécessaire de disposer d'une base de données suffisamment riche et diversifiée. Comme la méthode expérimentale (essai-erreur) s'avère lente et très coûteuse, un modèle numérique capable de reproduire le comportement du procédé pourrait contribuer à générer des données suffisamment fiables pour constituer une base adéquate dans le développement du modèle prédictif. L'approche adoptée est structurée en trois étapes combinant modélisation numérique 3D, validation expérimentale, simulation 3D, et analyse statistique pour constituer la base de données que nécessite le développement d'un modèle prédictif rapide, précis et robuste.

L'étape 1 consiste à développer le modèle numérique 3D. Il est basé sur les équations de transfert thermique et sur les transformations métallurgiques et réalisé à l'aide de la méthode des éléments finis sur le logiciel Comsol Multiphysique. Ce modèle permet de simuler le comportement du procédé dans une large gamme de conditions de fonctionnement du procédé y compris celles qui sont difficiles à réaliser expérimentalement. Le modèle numérique est par la suite validé à l'aide de données obtenues par expérimentation avec une évaluation qualitative et quantitative des effets des paramètres et des conditions du traitement sur la variation du profil de dureté. Les expériences considérées sont réalisées en utilisant un laser Nd-YAG 3KW selon une planification structurée d'expériences basée sur la méthode Taguchi. Dans cette application, les efforts ont porté principalement sur l'évaluation des profondeurs durcies aux sommets et aux pieds des dents d'un engrenage en acier 4340 en fonction de la puissance du laser, de la vitesse de balayage et de la vitesse de rotation de la pièce à traiter.

La seconde étape consiste à utiliser le modèle 3D dans une campagne massive de simulations dans le but d'analyser les effets des paramètres et des conditions du traitement sur la variation du profil de dureté et de la profondeur durcie en utilisant des outils statistiques éprouvés. Les effets moyens de chaque paramètre sur la profondeur durcie, les contributions des paramètres dans la variation des performances du traitement ainsi que les effets des interactions entre les différents paramètres sont évalués et analysés.

La troisième étape consiste à exploiter les données obtenues afin de développer un modèle de prédiction basé sur les réseaux de neurones artificiels. En effet, contrairement aux modèles numériques, un modèle à base de réseaux de neurones artificiels permet de prédire les profondeurs durcies avec plus de rapidité et de précision. Pour mettre en œuvre ce modèle, les données obtenues à partir des expériences et les données obtenues à partir des simulations sont combinées pour former la base de données la plus large et la plus diversifiée possible pour constituer un fondement adéquat dans les phases d'apprentissage et de validation du modèle prédictif. A noter que plusieurs critères sont utilisés pour tester et valider la qualité des prédictions du modèle et de sa capacité de généralisation.



## CHAPITRE 2

### FORMULATIONS MATHÉMATIQUES

La modification de surface au laser est utilisée pour changer soit la composition de la surface, soit la microstructure d'un matériau pour lui donner certaines propriétés souhaitées. Le durcissement par transformation de surface consiste à exposer la surface d'un matériau à un cycle thermique de chauffage et de refroidissement rapides de sorte que les couches de surface dans le cas des aciers soient d'abord austénitisées, puis trempées pour induire une transformation martensitique. Le processus n'implique pas de fusion et les transformations se produisent à l'état solide. Dans ce chapitre, nous présentons les équations mathématiques pour le modèle thermique et pour le modèle de transformations métallurgiques.

#### 2.1 MODÈLE THERMIQUE

Les modèles développés utilisent généralement l'équation de flux thermique de Fourier et Kirchhoff [28], dans le but d'obtenir la distribution spatio-temporelles de la température enregistrée, puis le profil de dureté est déterminé à l'aide des équations mathématiques des transformations métallurgiques créées par Ashby et Easterling [17].

En général, les modèles mathématiques non linéaires de transfert de chaleur par conduction en milieu homogène et isotrope prennent la forme suivante :

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

$\rho$  est la densité,  $C_p$  est la chaleur spécifique, et  $k$  la conductivité thermique du matériau.  $x$ ,  $y$ ,  $z$  désignent les coordonnées cartésiennes.  $Q(x, y, z, t)$  représente la source de chaleur créée par le faisceau laser.

Le durcissement par transformation laser à l'aide d'une source de chaleur gaussienne produit une surface traitée de haute qualité. Un certain nombre d'études ont été menées pour modéliser le transfert thermique du durcissement par transformation laser [8, 25, 26]. Dans cette étude, le flux thermique utilisé pour simuler le faisceau laser correspond à une source de chaleur de type gaussienne, qui est donnée par l'équation 2 : [8]

$$Q = Q_0 \times \exp\{-2 \times [(z - (z_0 + V \times t))^2 + \alpha^2] / d_L^2\} \quad (2)$$

$Q$  ( $W / m^2$ ) représente un flux de chaleur gaussien se déplaçant le long de l'axe  $z$  avec une vitesse  $V$  et tournant simultanément autour de cet axe avec une vitesse de rotation  $w$ .  $d_L$  est le diamètre du faisceau gaussien,  $Rc$  est le coefficient de réflexion de la surface du matériau choisi.  $z_0$  est la coordonnée du centre du faisceau le long de l'axe  $z$  à  $t = 0$  s.

$Q_0$  est donné par l'équation 3 :

$$Q_0 = 2 \times P \times (1 - Rc) / (\pi \times d_L) \quad (3)$$

$P$  est la puissance du faisceau laser,  $\alpha$  est orthonormé à la direction du faisceau laser à la surface de la pièce, et donné par l'équation 4 :

$$\alpha = \sin(w \times t) \times y - \cos(w \times t) \times x \quad (4)$$

Dans cette étude,  $T_0$  est la température initiale de la pièce, et cette température sera la température de préchauffage définie [10].

## 2.2 MODÈLE MÉTALLURGIQUE

Le processus global de transformation lors du traitement thermique des aciers se déroule en trois étapes principales [8] : (i) La transformation contrôlée par diffusion de la perlite en austénite (dissolution de la perlite), (ii) L'homogénéisation contrôlée par diffusion du carbone dans l'austénite et (iii) La transformation sans diffusion de l'austénite en martensite.

Lorsque le matériau est chauffé au-dessus de la température de l'eutectoïde ( $Ac_1$ ), les colonies de perlite se transforment en austénite. Avec l'augmentation de la température (sans fusion), la taille des régions d'austénite augmente par la diffusion vers l'extérieur du carbone des colonies de perlite à haute teneur en carbone dans la région de ferrite (figure 5.a).

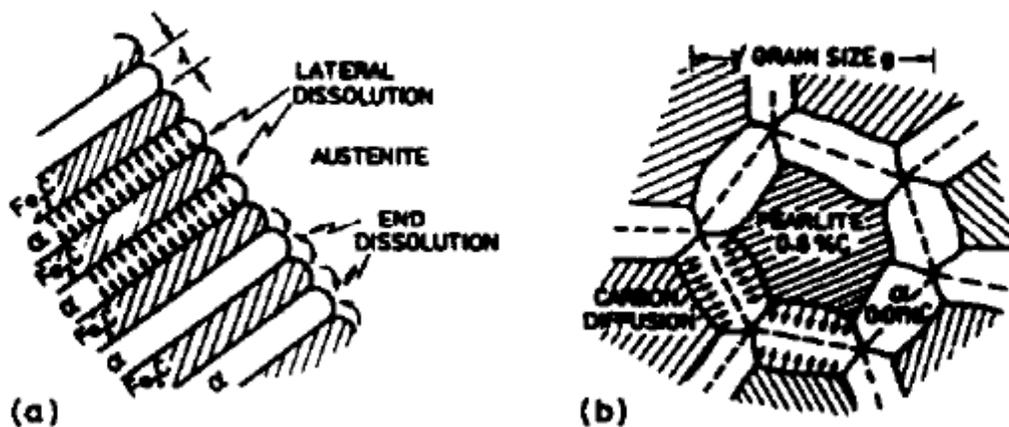


Figure 5: a) Dissolution de la perlite, b) l'homogénéisation de l'austénite [17]

Une fois que les colonies de perlite se sont transformées en austénite, le carbone diffuse vers l'extérieur de ces régions métamorphiques dans le pré-ferrite en augmentant la taille de la fraction d'austénite. Ce processus s'appelle Homogénéité de l'austénite (figure 5.b).

Les changements structurels sont affectés par le nombre total de sauts diffus qui se produisent pendant le cycle thermique, le nombre total de sauts est donné par la force cinétique :

$$I = \int \exp\{-Q/(R_g \times T[t])\} dt \quad (5)$$

Q est l'énergie d'activation pour la transformation et  $R_g$  est la constante des gaz.

Nous pouvons écrire l'équation (5) comme suit :

$$I = \alpha \times \tau \times \exp\{-Q/(R_g \times T_p)\} \quad (6)$$

$T_p$  est la température maximale à la profondeur considérée et  $\tau$  est la constante de temps thermique.

Les termes  $\alpha$  et  $\tau$  sont approximés par les équations 7 et 8.

$$\alpha = 3\sqrt{R \times T_p/Q} \quad (7)$$

$$\tau = (1 - R_c) \times P / (2 \times \pi \times k \times e^1 \times V_L \times [T_p - T_0]) \quad (8)$$

$k$  est la conductivité thermique,  $V_L$  est le suivi de la vitesse laser (Laser velocity tracking).  $T_0$  Représente la température initiale de préchauffage.

Au-dessus de la température  $Ac_1$ , la perlite se transforme presque instantanément en austénite. Lors de l'homogénéisation, le carbone diffuse vers l'extérieur des colonies transformées (Figure 6). La perlite devient une austénite contenant  $C_e = 0,8\%$  de carbone, qui est le même carbone que la perlite; Lors d'un refroidissement ultérieur, tous les matériaux ayant une teneur en carbone supérieure à la valeur critique  $C_c$ , (que nous considérons  $0,05\%$  en poids) se transforment en martensite [17].

La Fraction volumique occupée par les colonies de perlites (et fraction volumique subséquente minimale de martensite)  $f_i$  est :

$$f_i = (C - C_f)/(0.8 - C_f) \approx C/0.8 \quad (9)$$

$C_f$  est la teneur en carbone négligeable de la ferrite et  $C$  est la teneur en carbone de l'acier.

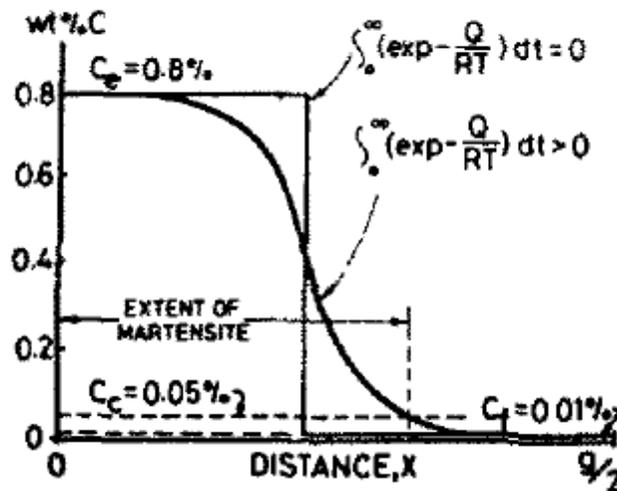


Figure 6: Profil de diffusion lors de l'homogénéisation [17]

La fraction volumique maximale autorisée par le diagramme de phase (TTT) est :

$$\begin{aligned}
f_m &= 0 && \text{if } T_p < A_{c_1} \\
f_m &= f_i + (1 - f_i) \times (T_p - A_{c_1}) / (A_{c_1} - A_{c_3}) && \text{if } A_{c_1} \leq T_p \leq A_{c_3} \\
f_m &= 1 && \text{if } T_p > A_{c_3}
\end{aligned}$$

$A_{c_1}$  est la température d'austénitisation (le début de la transformation).  $A_{c_3}$  (K) est la température d'austénitisation complète.

La fraction volumique de la martensite est alors donnée par l'équation 10 [17].

$$f = f_m - (f_m - f_i) \times \exp \left\{ - (12 \times f_i^{\frac{2}{3}}) / (\sqrt{\pi} \times g) \times \ln [C_e / (2 \times C_c)] \times \sqrt{D_0 \times I} \right\} \quad (10)$$

$g$  est la taille moyenne des grains et  $D_0$  est la constante de diffusion du carbone dans la ferrite.

La dureté peut alors être calculée par une règle de mélange (équation 11).

La dureté du Vickers HV pour la surface traitée dépend de la taille de la fraction martensitique et de sa teneur en carbone [8]. La dureté peut être calculée par une règle de mélange (équation 11).

$$HV = f \times HV_m + (1 - f) \times HV_{f+p} \quad (11)$$

Les valeurs  $HV_m$  et  $HV_{f+p}$  sont données par des équations de Maynier qui prennent en compte la vitesse de refroidissement et la composition [5].

La dureté de la martensite  $HV_m$ , et la dureté de la ferrite plus la perlite  $HV_{f+p}$  sont exprimées par les équations (12) et (13) :

$$HV_m = 127 + 949C + 27Si + 11Mn + 8Ni + 16Cr + 21 \log V_r \quad (12)$$

$$HV_{f+p} = 42 + 223C + 53Si + 30Mn + 12.6Ni + 7Cr + 19Mo + \log V_r (10 - 19Si + 4Ni + 8Cr + 130V) \quad (13)$$

$V_r$  est la vitesse de refroidissement en °C/h.

Dans cette étude, une table de conversion de dureté approximative pour les aciers non austénitiques (gamme de dureté Rockwell C) a été intégrée dans le modèle afin de convertir les valeurs de dureté Vickers HV en dureté Rockwell.



## **CHAPITRE 3**

### **SIMULATION NUMÉRIQUE 3D**

La simulation numérique représente un outil puissant permettant de mieux comprendre le comportement global du procédé de traitement thermique par laser et de quantifier les effets de la géométrie de la pièce, de ses propriétés physicochimiques et des paramètres de chauffage sur la distribution de température dans la pièce traitée et ainsi déduire le profil de dureté et la profondeur durcie. Ce chapitre présente le développement et la simulation du modèle numérique 3D du traitement thermique par laser des engrenages.

#### **3.1 MATÉRIAUX ET PARAMÈTRES DE SIMULATION**

##### **3.1.1 Caractéristiques de la pièce**

Le domaine de travail se compose de trois matériaux, notamment l'acier 4340, l'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et l'air. Afin de simuler le processus de chauffage en utilisant la méthode de résolution par éléments finis, la pièce a été conçue à l'aide du logiciel COMSOL. L'engrenage en acier 4340 avec 48 dents a un diamètre extérieur de 105 mm, un diamètre intérieur de 30 mm et une épaisseur de 6,5 mm (voir figure 7). Deux anneaux en Oxyde d'aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont fixés aux deux côtés de l'engrenage, comme illustré à la figure 8.

##### **3.1.2 Propriétés de l'acier AISI 4340**

Les propriétés des différents matériaux utilisés dans la simulation sont présentées ci-après. Le tableau 1 présente la composition chimique de l'acier 4340 [10]. Les deux températures de la conversion de la martensite pour l'acier 4340 sont  $Ac1 = 996 \text{ K}$  et  $Ac3 =$

1063,15 K, La température initiale  $T_0$  est fixée à 753,15 K (température de préchauffage de la pièce), le coefficient d'absorption de la pièce  $A_c$ , est supposé constant 800[1/m]. Le tableau 2, présente les différentes propriétés physico-chimiques de l'acier AISI 4340.

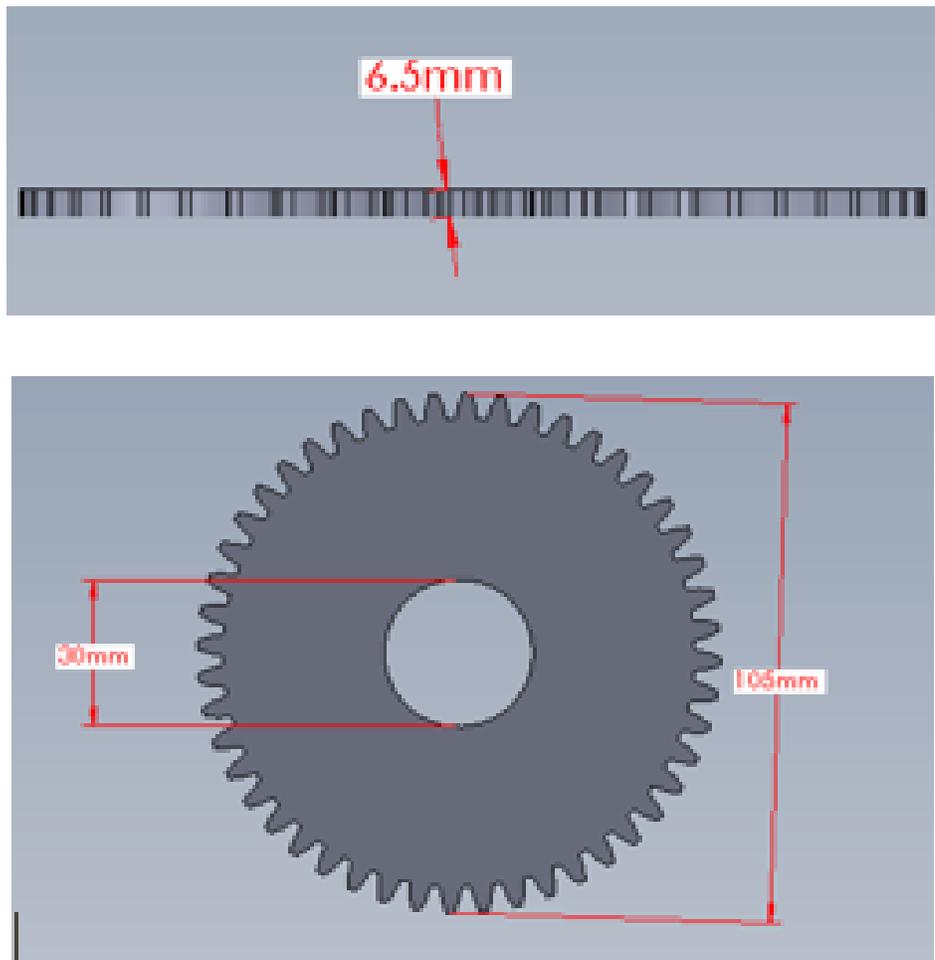


Figure 7: Caractéristiques dimensionnelles de l'engrenage

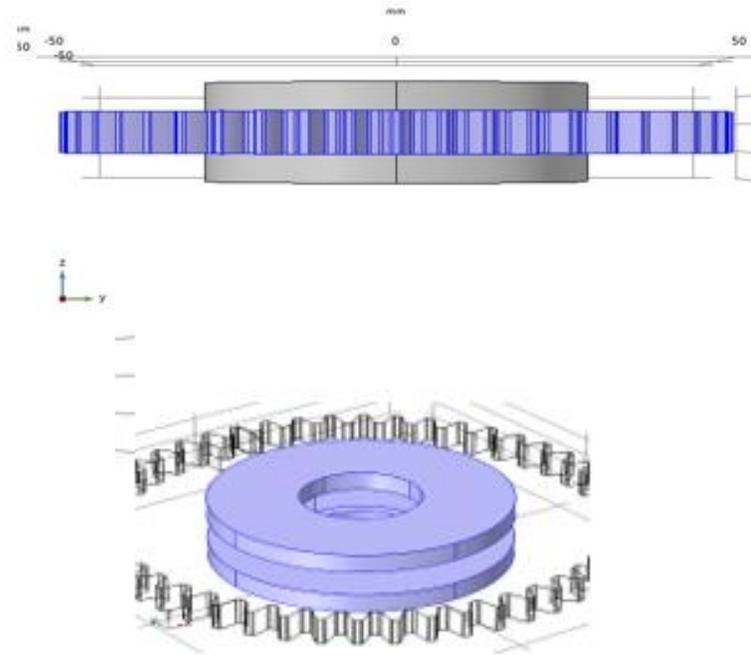


Figure 8: Anneaux en aluminium Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fixés les deux côtés de l'engrenage en acier 4340

Tableau 1: Composition chimique pour acier AISI 4340 [10]

| <b>Élément</b>        | <b>Composition %</b> |
|-----------------------|----------------------|
| <b>Fer (Fe)</b>       | 95.195 – 96.33       |
| <b>Nickel (Ni)</b>    | 1.65 – 2.00          |
| <b>Chrome (Cr)</b>    | 0.7 – 0.9            |
| <b>Manganèse (Mn)</b> | 0.6 – 0.8            |
| <b>Carbone (C)</b>    | 0.380 – 0.430        |
| <b>Molybdène (Mo)</b> | 0.2 – 0.3            |
| <b>Silicium (Si)</b>  | 0.15 – 0.300         |
| <b>Soufre (S)</b>     | 0.04                 |
| <b>Phosphore (P)</b>  | 0.0350               |

Tableau 2: Propriétés physico-chimiques de l'acier allié 4340 [10]

| <b>Propriété</b>   | <b>Symbole</b>       | <b>Unité</b>      | <b>Valeur</b>       |
|--|----------------------|-------------------|---------------------|
| <b>Coefficient de réflexion</b>  | Rc                   |                   | 0.6                 |
| <b>Température eutectoïde</b>  | Ac1                  | K                 | 996                 |
| <b>Température d'austénitisation</b>                                   | Ac3                  | K                 | 1063.15             |
| <b>Granulométrie de l'austénite (supposée)</b>                         | g                    | µm                | 10                  |
| <b>Énergie d'activation de la diffusion du carbone dans la ferrite</b> | Q                    | kJ/mol            | 80                  |
| <b>Pré-exponentielle pour la diffusion du carbone</b>                  | D0                   | m <sup>2</sup> /s | 6× 10 <sup>-5</sup> |
| <b>Constante de gaz</b>  | R                    | J/ mol.<br>K      | 8.314               |
| <b>Teneur en carbone de l'acier</b>                                    | C                    |                   | 0.43%               |
| <b>Teneur en carbone de l'austénite</b>                                | Ce                   |                   | 0.8%                |
| <b>Teneur en carbone ferrite</b>                                       | Cf                   |                   | 0.01%               |
| <b>Valeur critique de la teneur en carbone</b>                         | Cc                   |                   | 0.05%               |
| <b>Fraction volumique des colonies de perlites</b>                     | <i>f<sub>i</sub></i> |                   | 0.5375%             |

Les propriétés principales de l'acier 4340 mises en jeu dans le procédé de traitement par laser sont : la conductivité thermique, la résistivité, la densité, la conductivité électrique, le coefficient d'absorption, et la chaleur spécifique (voir tableau 3). La chaleur spécifique  $C_p$  représente la quantité d'énergie thermique qu'il est nécessaire de fournir à un corps de 1kg de masse pour élever sa température de 1°C. Elle dépend de la structure du matériau, de

la température et de la vitesse de chauffage [8], Dans cette étude, Le coefficient d'absorption, et la Chaleur spécifique sont considérées constants (voir Tableau 4).

Tableau 3: Propriétés de base pour acier 4340

| <b>Propriété</b>                               | <b>Symbole</b> | <b>Unité</b>      |
|--|----------------|-------------------|
| <b>Conductivité thermique</b>                  | <i>k</i>       | W/ (m·K)          |
| <b>Résistivité</b>                             | res            | $\Omega \cdot m$  |
| <b>Conductivité électrique</b>                 | sigma          | S/m               |
| <b>Densité</b>                                 | rho            | kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Coefficient d'absorption</b>                | Ac             | 1/m               |
| <b>Capacité thermique à pression constante</b> | Cp             | J/ (kg·K)         |

Tableau 4: Coefficient d'absorption et Chaleur spécifique

|  | <b>Symbole</b> | <b>Valeur</b> | <b>Unité</b> |
|--|----------------|---------------|--------------|
| <b>Coefficient d'absorption</b>                | Ac             | 800           | 1/m          |
| <b>Capacité thermique à pression constante</b> | Cp             | 475           | J/ (kg·K)    |

Le tableau 5 présente les paramètres de base pour les propriétés thermiques suivantes : la conductivité thermique, la résistivité, la densité, la conductivité électrique. La conductivité thermique représente la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Cette propriété est

une fonction complexe de la structure du matériau (du traitement initial appliqué au matériau), de la taille des grains, de la température et de la vitesse de chauffage [8].

Tableau 5: Paramètres de base considérés comme principales propriétés de l'acier 4340

| Description                    | Valeur   |
|--------------------------------|--|
| <b>Conductivité thermique</b>  | $\{\{k_{-}(T[1/K]) [W/(m*K)], 0, 0\}, \{0, k_{-}(T[1/K]) [W/(m*K)], 0\}, \{0, 0, k_{-1}(T[1/K]) [W/(m*K)]\}\}$ |
| <b>Résistivité</b>             | $\{\{res(T [1/K]) [ohm*m], 0, 0\}, \{0, res(T [1/K]) [ohm*m], 0\}, \{0, 0, res(T [1/K]) [ohm*m]\}\}$           |
| <b>Conductivité électrique</b> | $\{\{\sigma(T[1/K]) [S/m], 0, 0\}, \{0, \sigma(T[1/K]) [S/m], 0\}, \{0, 0, \sigma(T[1/K]) [S/m]\}\}$           |
| <b>Densité</b>                 | $\rho(T[1/K]) [kg/m^3]$  |

La figure 9 montre la variation de conductivité thermique d'un acier 4340 en fonction de la température. À 123 K, la valeur de conductivité thermique commence à augmenter avec l'augmentation de la température pour atteindre sa valeur maximale à 485 ° C, puis commence à diminuer par la suite. Les zones marquées en couleur rouge représentent le champ dans lequel la valeur de la conductivité thermique est constante. Les intervalles de temps sont exprimés dans les équations présentées dans le tableau 6.

Tableau 6: Intervalles de température utilisés pour la conductivité thermique

| début | fin | Fonction  |
|-------|-----|---|
| 123   | 813 | $16.18679+0.111621*T^1-1.715412E-4*T^2+7.543344E-8*T^3$ |

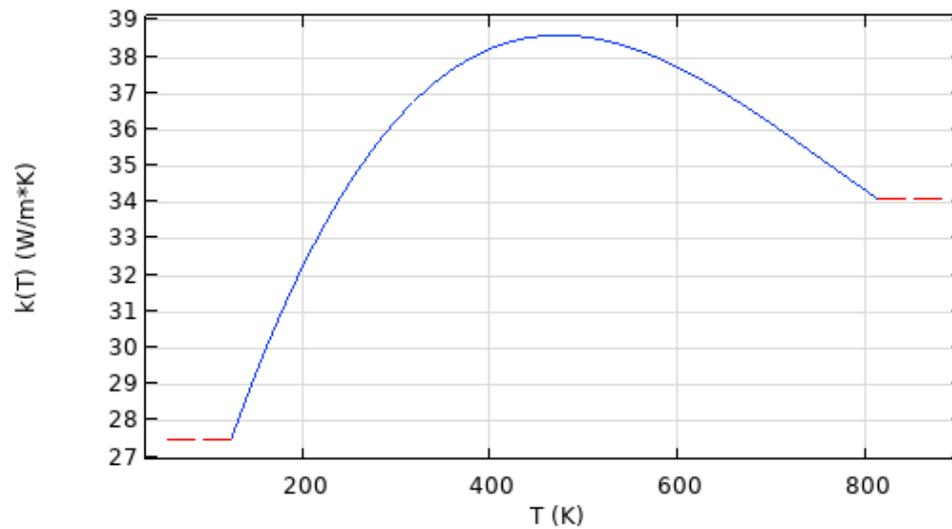


Figure 9: Intervalles de température utilisés pour la conductivité thermique

La figure 10 montre la résistivité en fonction de la température. En effet, lorsque la température atteint la valeur 4 K, la résistance commence à augmenter avec l'augmentation de la température jusqu'à la température de 293K, pour rester constante par la suite. Le tableau 7 montre les plages de températures utilisées pour la résistivité de l'acier 4340.

Tableau 7: Intervalles de température utilisés pour la résistivité de l'acier 4340

| début | fin  | Fonction   |
|-------|------|--|
| 4.0   | 19.7 | $1.814744E-7 + 6.389776E-12 * T^1$   |
| 19.7  | 293  | $1.827097E-7 - 1.322159E-10 * T^1 + 3.983511E-12 * T^2 - 6.561443E-15 * T^3$ |

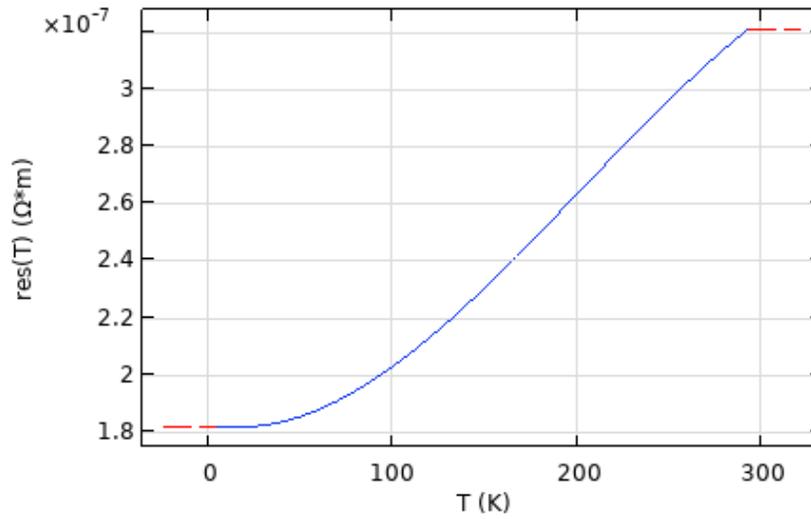


Figure 10: Résistivité en fonction de la température

La conductivité électrique ( $\sigma$ ) d'un matériau caractérise l'aptitude de ce dernier à laisser les charges électriques se déplacer librement et donc permettre le passage d'un courant électrique. Elle dépend de la température, de la composition chimique, de la microstructure et de la taille de grains. La conductivité électrique de l'acier 4340 décroît en fonction de la température (voir figure 11). Les intervalles de la température utilisés pour La conductivité électrique sont présents sur le tableau 8.

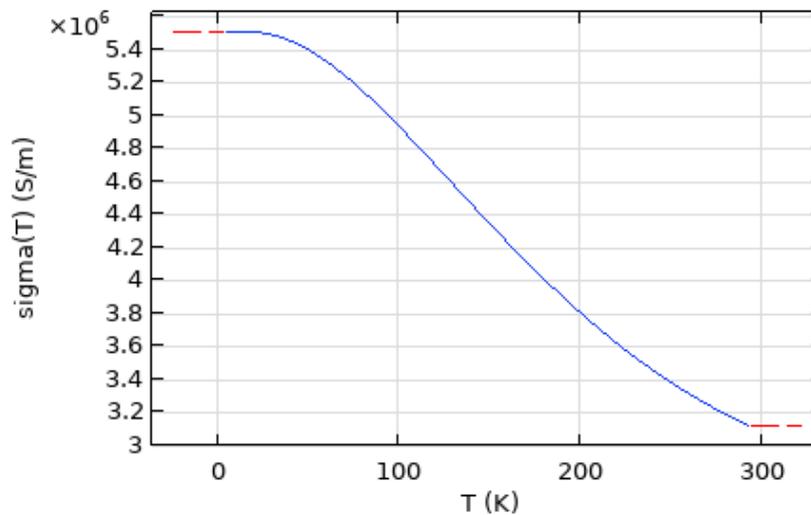


Figure 11: Conductivité électrique en fonction de la température

Tableau 8: Intervalles de la température utilisés pour la conductivité électrique

| début | fin  | Fonction   |
|-------|------|--|
| 4.0   | 19.7 | $1.814744E-7+6.389776E-12*T^1$                                       |
| 19.7  | 293  | $1/(-6.561443E-15*T^3+3.983511E-12*T^2-1.322159E-10*T+1.827097E-07)$ |

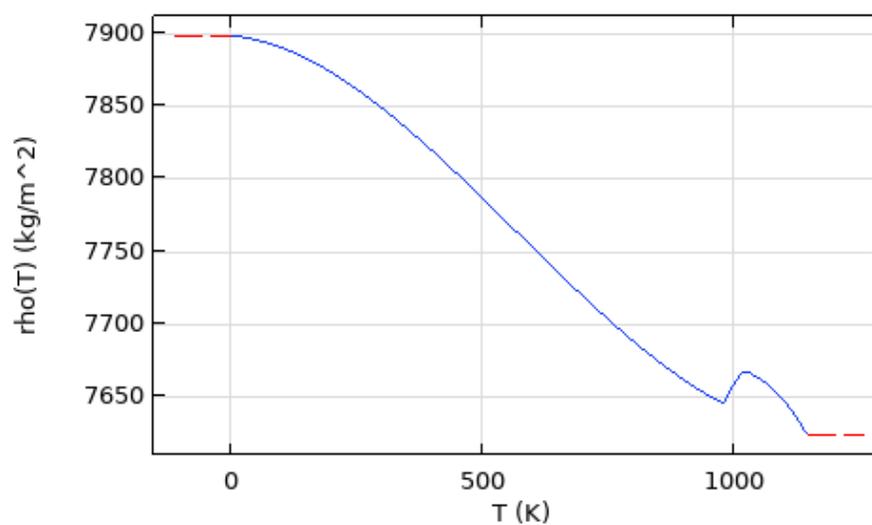


Figure 12: Densité dépendant de la température

La figure 12 illustre l'évolution de la densité de l'acier 4340 en fonction de la température, où l'on remarque que la densité diminue avec l'augmentation de la température. Le tableau 9 montre les intervalles de la température utilisés pour les valeurs de la densité.

Tableau 9: Intervalles de température utilisés pour la densité

| début | fin  | Fonction  |
|-------|------|---|
| 0     | 977  | $7898.051 - 0.03176636 * T^1 - 5.461645E-4 * T^2 + 3.208814E-7 * T^3$ |
| 977   | 1033 | $166145.4 - 483.0748 * T^1 + 0.4901236 * T^2 - 1.655348E-4 * T^3$     |
| 1033  | 1144 | $5616.404 + 4.115962 * T^1 - 0.002064516 * T^2$                       |

### 3.2 MAILLAGE

Comme le logiciel Comsol utilise la méthode des éléments finis, un maillage doit être bien défini. La géométrie est déterminée en utilisant un maillage tétraédrique très fin dans la zone représentée sur la figure 13, des éléments légèrement plus grands pour le reste des dents et un maillage grossier pour le reste de la géométrie (voir figure 14). Une étude de convergence du maillage est menée pour déterminer la taille optimale du maillage. Le tableau 10 présente les caractéristiques du maillage.

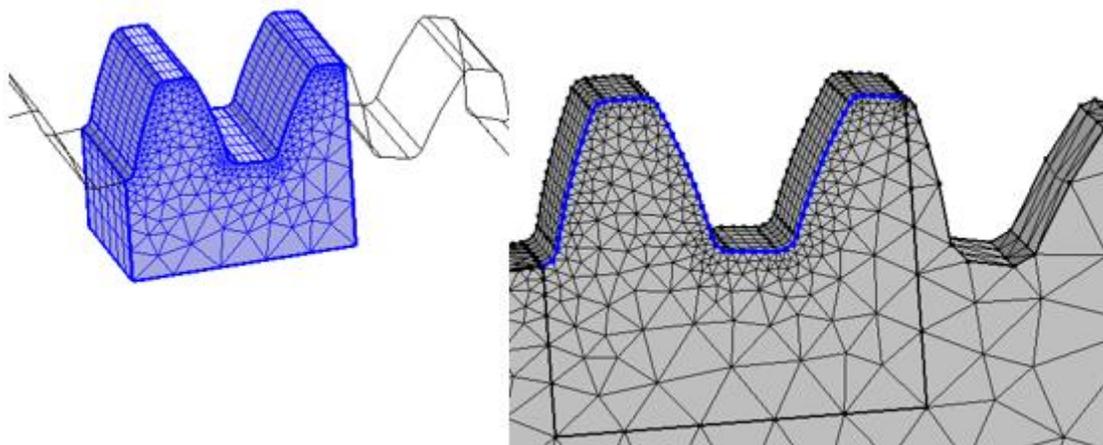


Figure 13: Maillage fin dans des parties spécifiques de l'engrenage

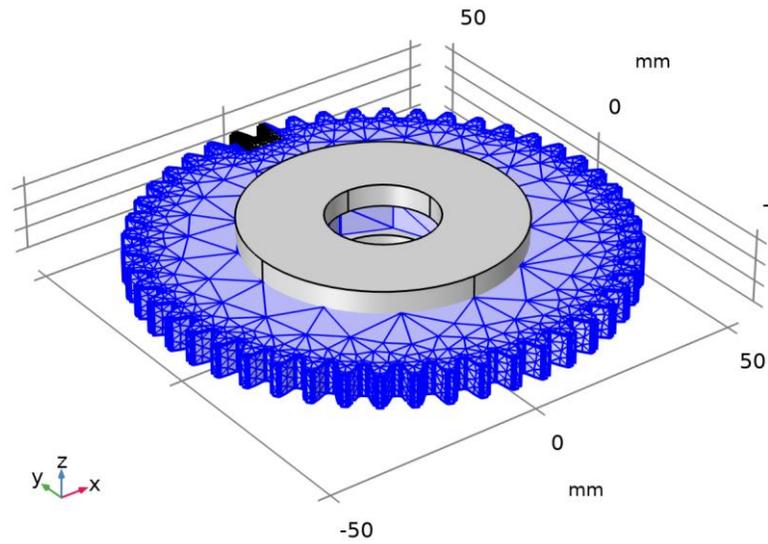


Figure 14: Maillage pour les différentes parties de la pièce

Tableau 10: Caractéristiques du maillage

| Description                   | Valeur (mm) |
|-------------------------------|-------------|
| Qualité minimale des éléments | 3.442E-4    |
| Qualité moyenne des éléments  | 0.4518      |
| Tétraèdre                     | 10513       |
| Pyramide                      | 132         |
| Prisme                        | 3060        |
| Triangle                      | 6886        |
| Quad                          | 528         |
| Élément de bord               | 2395        |
| Élément Vertex                | 792         |

Le maillage doit également être choisi pour avoir la meilleure précision, il vaut mieux choisir le maillage le plus fin possible (tant que les résultats convergent en un temps raisonnable). Une analyse de maillage est faite pour fusionner la sensibilité entre les résultats de simulation et la taille du maillage. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 15 où on peut voir la température maximale en fonction de la taille minimale de l'élément du maillage à  $t = 1$  s. Si on minimise la taille du maillage, au niveau des résultats, les températures maximales ne changent pas beaucoup.

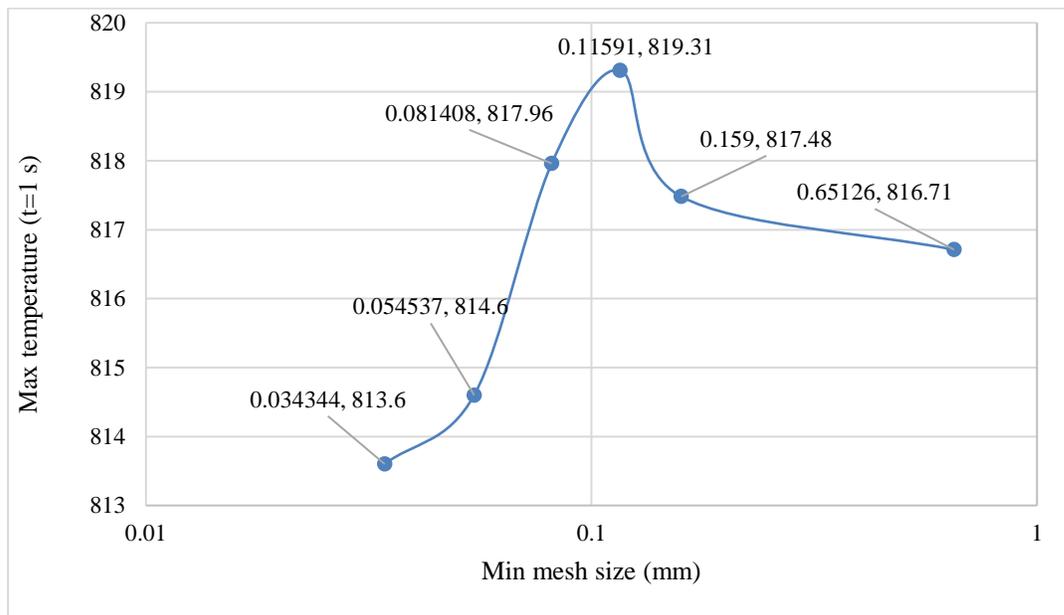


Figure 15: Analyse de maillage

La résolution des équations dans le domaine temporel utilise des algorithmes dits implicites ou explicites. Ces algorithmes procèdent en recalculant la solution à des instants successifs séparés par un pas de temps d'intégration choisi par l'utilisateur ou sélectionné automatiquement. Le pas de temps d'intégration doit respecter certaines conditions afin de permettre à la solution de converger (suffisamment faible) et de ne pas consommer des ressources informatiques trop importantes (pas trop petit). Pour le taux de convergence, On

peut obtenir une convergence plus rapide avec une augmentation de la tolérance relative. Mais cela nous fera perdre une certaine précision.

Pour le maillage et la taille du pas de temps, la tolérance relative est liée aux critères de convergence. Ainsi, si nous obtenons des valeurs de tolérance erronées ou inappropriées, tout ajustement de maillage et de pas de temps est inutile.

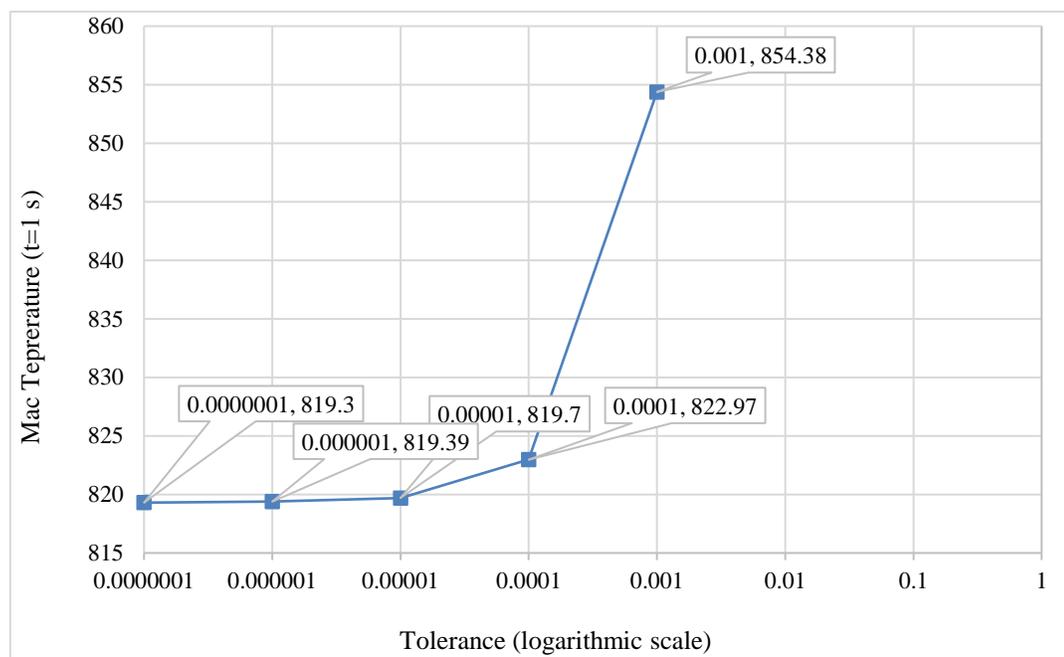


Figure 16: Analyse de la tolérance

Avant de commencer la simulation, une analyse de tolérance a été effectuée sur les résultats, la valeur de tolérance relative a été modifiée et chaque fois la température maximale à  $t = 1$  s a été mesurée comme indiqué dans la figure 16. On peut voir que, lorsque la tolérance est diminuée, les résultats ne changent pratiquement pas. De plus, les valeurs de température se stabilisent à partir du modèle E, ce qui correspond à un pas de calcul de 0,00001s.

### 3.3 CONDITIONS INITIALES ET CONDITIONS AUX LIMITES

On applique une isolation thermique sur toutes les surfaces de l'engrenage comme l'illustre la figure 17. La température sur toutes les surfaces de l'engrenage au début de calcul ( $t = 0$  s) est uniforme et égale à 753,15 K [10]

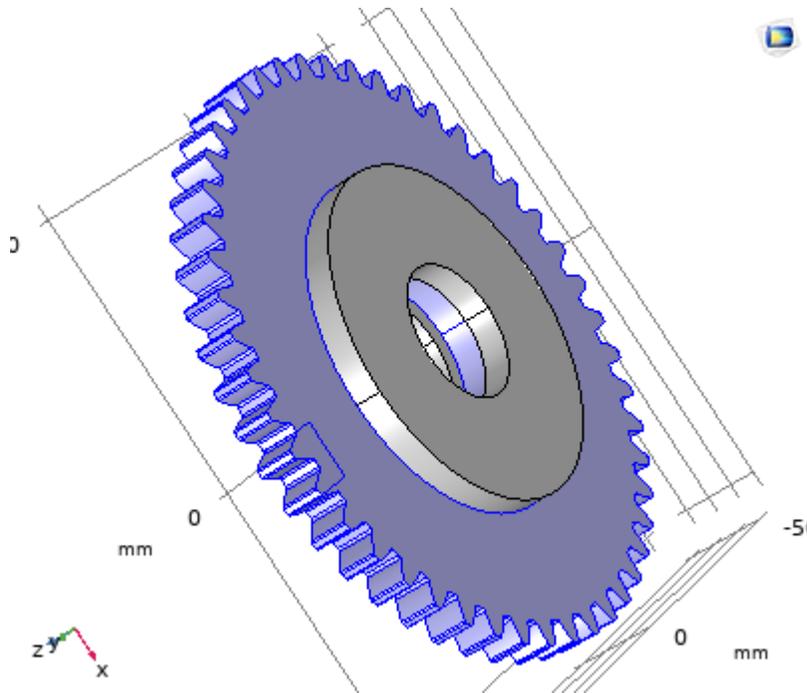


Figure 17: Isolation thermique des surfaces

Le faisceau laser a été appliqué dans une position stationnaire même si l'échantillon chauffé tournait pendant le chauffage, on a supposé que le diamètre du spot de faisceau  $d_L$  fixé à 1,08 mm. La Figure 18(a) montre les surfaces transparentes qui réfléchissent le faisceau laser (deux côtés de l'engrenage), tandis que la figure 18(b), montre les surfaces qui l'absorbent. A noter que la réflectivité et l'absorption sont deux phénomènes inverse [8].

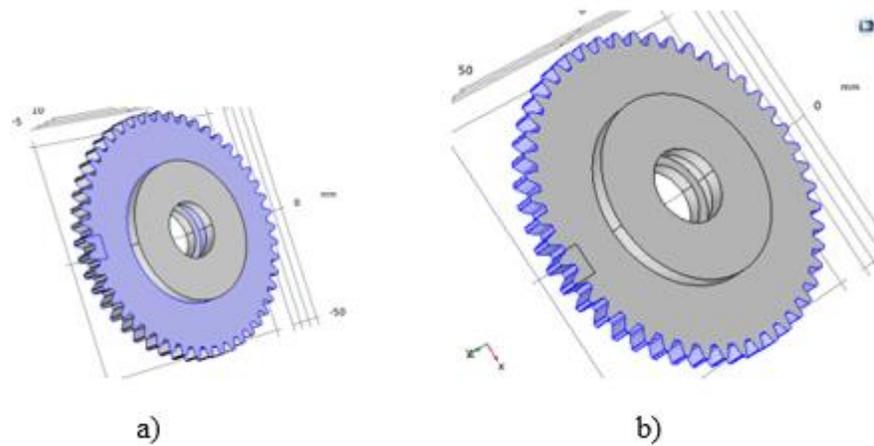


Figure 18: a) Représentation des surfaces transparentes réfléchissant le faisceau, b) et des surfaces qui absorbent le faisceau laser

Le logiciel COMSOL utilise principalement une méthode par éléments finis pour résoudre les problèmes liés à la présente étude. COMSOL raisonne principalement sur des entités géométriques (domaine, frontières, points) pour imposer les conditions aux limites prédéfinies. Les pertes de chaleur sont modélisées par les deux modes de transfert thermique, à savoir :

Des échanges par convection de la forme :

$$Q_{conv} = h(T_{ref} - T_0) \quad (14)$$

$h$  est un coefficient d'échange thermique ( $W/m^2.K$ ), et  $T_{ref}$  est la température du milieu extérieur,

Les échanges par rayonnement de la forme :

$$Q_{ray} = \varepsilon \times \sigma \times (T_{ref}^4 - T_0^4) \quad (15)$$

Où  $\varepsilon$  est l'émissivité de la surface  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

### 3.4 SIMULATION 3D

La figure 19 montre les contours isothermes sur quelques dents, pour une puissance de 2300 W, une vitesse de balayage de 0.45 mm / s et une vitesse de rotation de 3500 tr / min. La température initiale  $T_0$  (température de préchauffage) est fixée à 753.15 K. Ce que l'on remarque en premier c'est que le sommet de la dent est plus chaud que le pied.

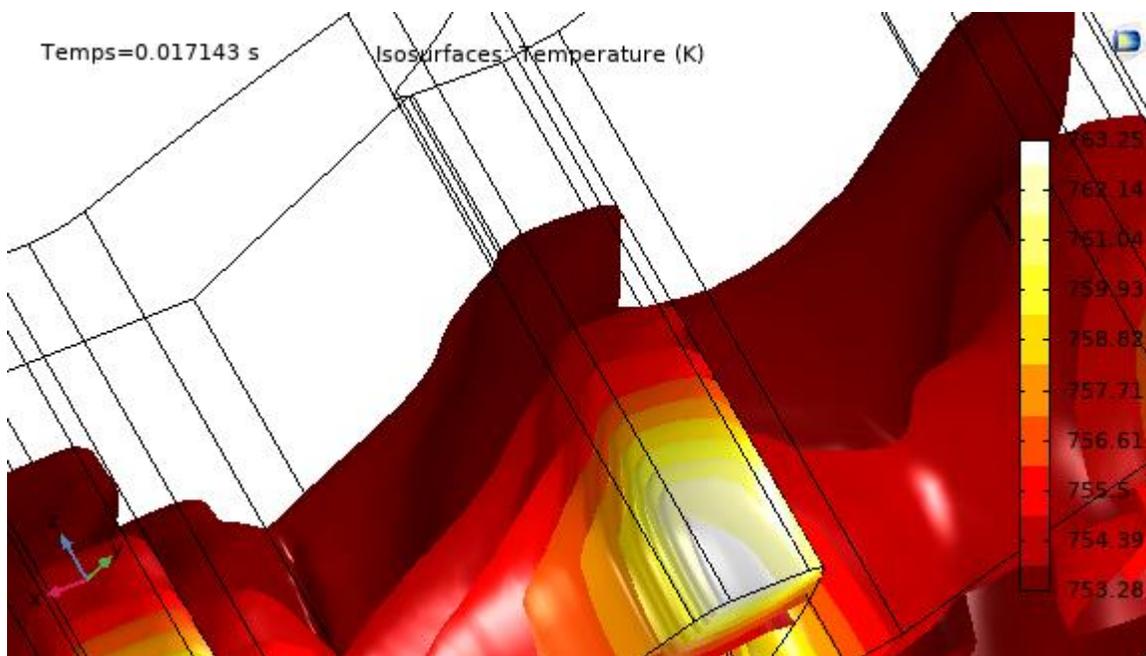


Figure 19: Contours isothermes dans le cas de  $P = 2300$  W,  $V = 0.45$  mm / s,  $w = 3500$  tr / min,  $T_0 = 753.15$  K

Une fois la distribution de température est déterminée, le profil de dureté est estimé à l'aide des équations de Ashby et Easterling [17]. Ces équations sont implémentées dans COMSOL pour obtenir la dureté au sommets et au pied des dents d'engrenage. Dans cette étude, une table de conversion approximative de la dureté pour les aciers non austénitiques est incluse dans le modèle pour convertir les valeurs de dureté Vickers HV en dureté

Rockwell. Enfin, la courbe de dureté Rockwell HRC est obtenue en fonction de la profondeur de trempe en mm.

Les figures 20 et 21 et 22, représentent les courbes de dureté. Les effets de P, V, et w, sur la variation du profil de dureté. Le profil de dureté peut être divisé en trois régions, la première région est totalement austénitisée et transformée en martensite lors d'un refroidissement rapide. La deuxième région est identifiée par une diminution radicale de la dureté avant d'atteindre la dureté initiale. La troisième région correspond à la zone non affectée par le flux thermique.

Les résultats de la simulation montrent que la dureté peut atteindre jusqu'à 55 HRC, et diminuer relativement le long de la profondeur de trempe jusqu'à ce que la valeur de dureté initiale soit atteinte. De ces résultats préliminaires, plusieurs observations peuvent être faites. En effet, la réduction de la vitesse de balayage et la réduction de la vitesse de rotation de la pièce augmentent la profondeur de trempe. Cependant, l'augmentation de la puissance du laser entraîne une augmentation de la profondeur de trempe.

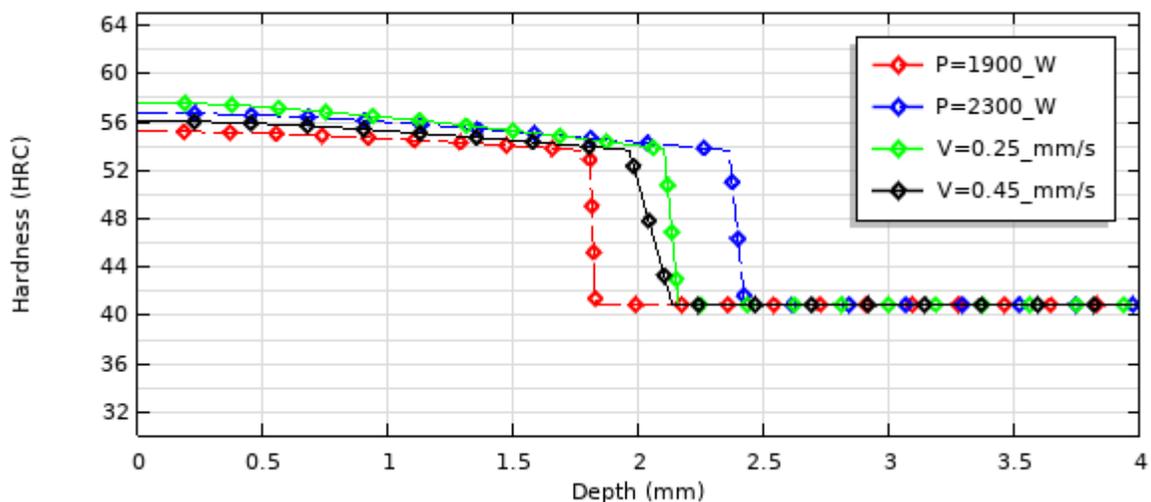


Figure 20: Courbes de dureté typiques au sommet de la dent d'engrenage en fonction des paramètres de processus P et V

La figure 20 montre la variation de la profondeur durcie au sommet de la dent en fonction de la puissance et de la vitesse. Deux niveaux sont attribués pour chacun des deux paramètres P et V, tandis que la vitesse de rotation est fixée à 3000 tr / min (voir tableau 11). On constate que la profondeur diminue quand la vitesse de balayage augmente et augmente quand la puissance augmente.

Tableau 11: Niveaux des paramètres P, V, w

| w (tr/min) | V (mm/s) | P(W) |
|------------|----------|------|
| 3000       | 0.25     | 1900 |
| 3000       | 0.45     | 1900 |
| 3000       | 0.25     | 2300 |

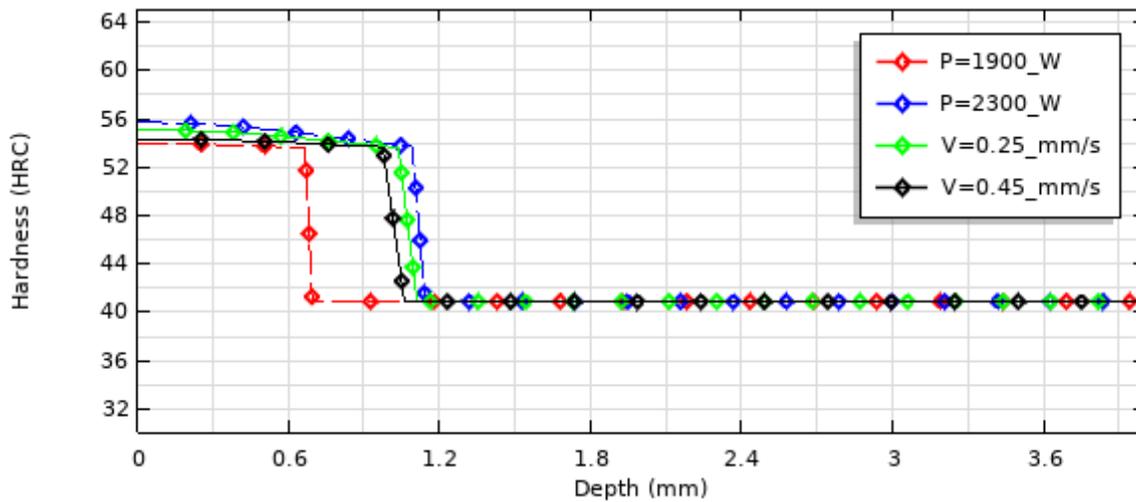


Figure 21: Courbes de dureté typiques au pied de la dent d'engrenage en fonction des paramètres de processus P et V

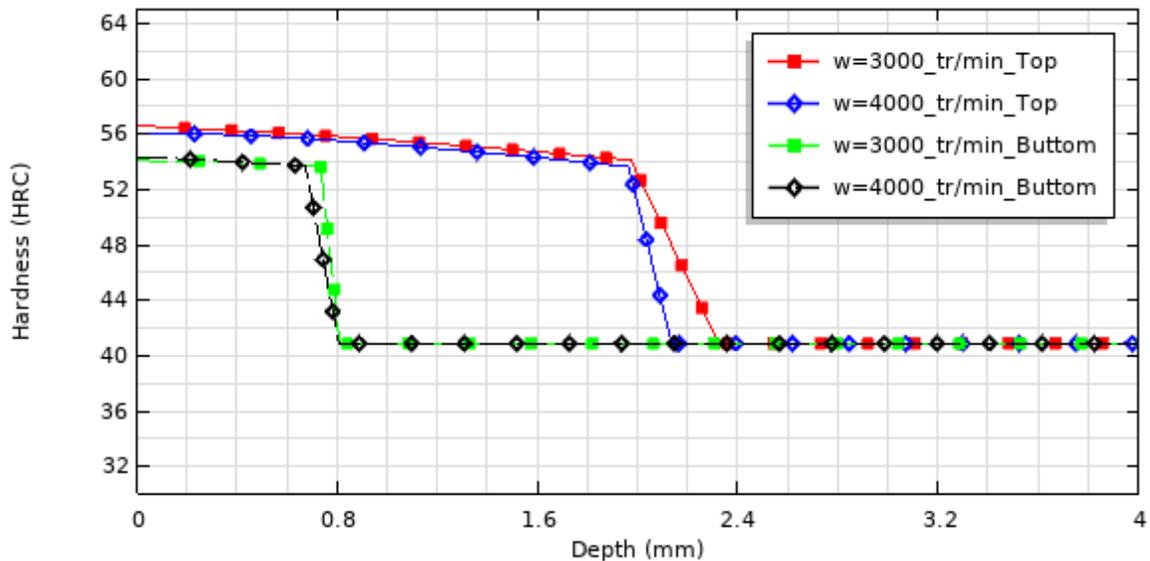


Figure 22: Courbes de dureté typiques au sommet et au pied de la dent d'engrenage en fonction de paramètre de processus  $w$ .  $P=1900W$ ,  $V=0.25mm/s$

Sur la partie inférieure des dents d'engrenage, ce n'est pas très différent. Les observations précédentes sont confirmées comme le montre la figure 21, de sorte que si la vitesse de balayage est réduite, la profondeur de trempe augmente. Et avec l'augmentation de  $P$ , la profondeur de trempe augmente. La figure 22 montre la courbe de dureté en termes de vitesse de rotation, où l'on peut observer que lorsque la vitesse de rotation est réduite de 4000 à 3000 tr/min, la profondeur de durcissement supérieure et inférieure ne change pas beaucoup avec cette réduction.

Après ces observations, on peut dire que l'effet des trois paramètres sur la profondeur de durcissement est évident. Il ressort clairement de ces résultats préliminaires que l'effet de la puissance du laser est plus important que celui de la vitesse de balayage et de la vitesse de rotation. Et comme le montre la figure 16, la vitesse de rotation a moins d'effet par rapport aux autres paramètres.

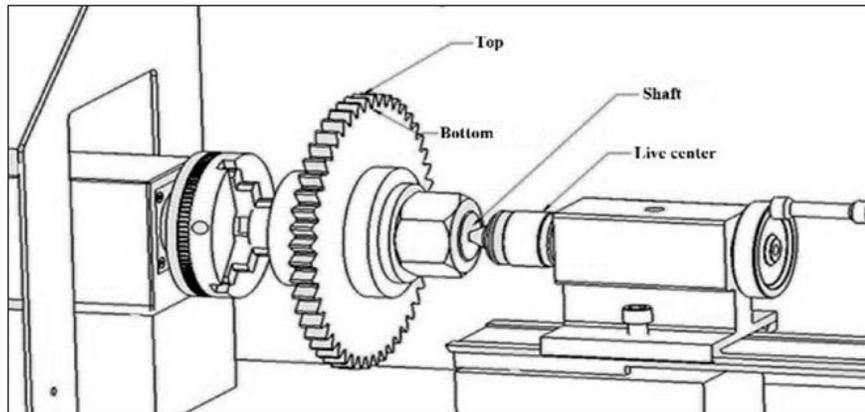
Dans la prochaine partie, nous procéderons à la validation du modèle à l'aide d'une série de tests expérimentaux. Nous procéderons également à une analyse statistique des résultats obtenus afin de connaître l'influence de ces paramètres sur la profondeur de trempe.

## **CHAPITRE 4**

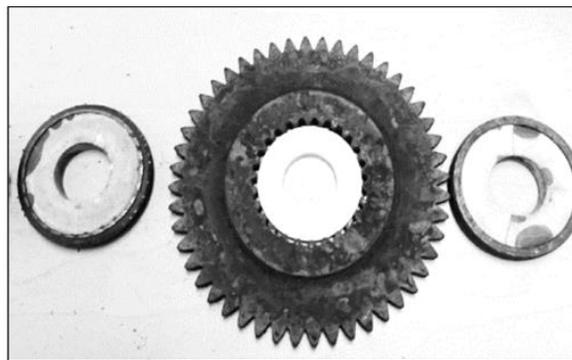
### **VALIDATION DU MODÈLE 3D, SIMULATIONS ET ANALYSE DES EFFETS DES PARAMETRES DU TRAITEMENT SUR LA VARIATION DE LA PROFONDEUR DURCIE**

Ce chapitre présente une validation expérimentale du modèle numérique 3D, la planification et l'exécution d'une campagne de simulations dans le but de simuler le comportement du procédé de durcissement dans diverses conditions, notamment dans des conditions difficiles à réaliser expérimentalement et finalement la conduite d'une analyse structurée permettant l'évaluation méthodique des effets des paramètres et des conditions du traitement sur la variation du profil de dureté et des profondeurs durcies. La validation du modèle est basée sur des données expérimentales produites par Borki et al.[10]. Les expériences ont été réalisées avec un engrenage en acier 4340 d'un diamètre extérieur de 105 mm. L'échantillon est monté sur un banc d'essai pouvant atteindre des vitesses de rotation allant jusqu'à 4000 tr / min. La source de chaleur laser utilisée est un IPG YLS-3000-ST2 générant une puissance de sortie de 3,2 kW à une longueur d'onde de 1064 nm. On suppose que les différentes parties de la surface exposée au faisceau laser recevraient la même qualité de chaleur. Au cours de l'expérience, il a fallu éviter le transfert de chaleur de l'ensemble de l'engrenage aux composants du petit tour. À cette fin, des bagues en céramique d'alumine ont été insérées entre l'arbre et l'engrenage, comme le montre la figure 23.

La validation expérimentale du modèle a été effectuée à l'aide de 9 tests expérimentaux. Un plan expérimental orthogonal L9 à 3 facteurs, ayant chacun 3 niveaux, a été utilisé. Les trois facteurs pris en compte sont : la puissance du laser, la vitesse de balayage du faisceau et la vitesse de rotation. Le tableau 12 montre les différentes combinaisons de paramètres qui illustrent le plan d'expérience dédié à la validation du modèle numérique 3D.



(a)



(b)

Figure 23: Ensemble d'engrenages : (a) Vue d'ensemble de l'ensemble d'engrenages et (b) ensemble d'anneaux en céramique [26]

Tableau 12: Tests de validation expérimentale

| <b>Test</b> | <b>P [W]</b> | <b>V [mm/s]</b> | <b>w [tr/min]</b> |
|-------------|--------------|-----------------|-------------------|
| $T_1$       | 1900         | 0.25            | 3000              |
| $T_2$       | 1900         | 0.35            | 3500              |
| $T_3$       | 1900         | 0.45            | 4000              |
| $T_4$       | 2100         | 0.25            | 3500              |
| $T_5$       | 2100         | 0.35            | 4000              |
| $T_6$       | 2100         | 0.45            | 3000              |
| $T_7$       | 2300         | 0.25            | 4000              |
| $T_8$       | 2300         | 0.35            | 3000              |
| $T_9$       | 2300         | 0.45            | 3500              |

#### 4.1 COMPARAISON POUR LA PROFONDEUR DURCIE ENTRE LA SIMULATION ET L'EXPÉRIMENTATION

La figure 24 montre une comparaison entre la profondeur de durcissement expérimentale (au sommet et au pied de la dent) et la profondeur obtenue par simulation pour le test T 4. On peut voir que la profondeur de durcissement de la tête de la dent obtenue par simulation est presque identique à celle obtenue dans l'expérience. Pour la partie inférieure de la dent, une profondeur approximativement identique pour la simulation et l'expérience est aussi obtenue.

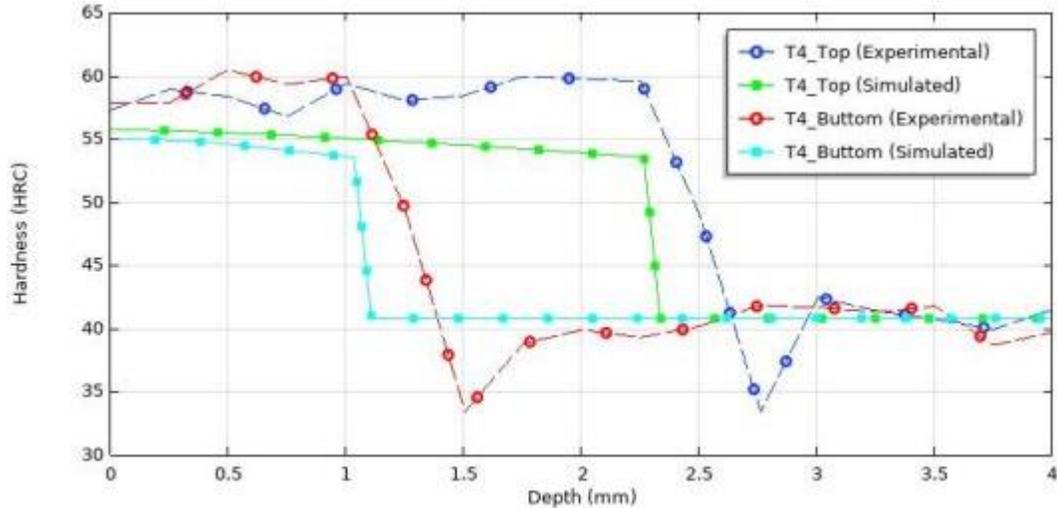


Figure 24: Comparaison de la profondeur durcie entre la simulation et l'expérience pour le test T4

Dans les expériences, les valeurs minimales de la profondeur de trempe (haut et bas) sont obtenues dans l'essai 3 en utilisant 1900 W, 0,45 mm / s et 4000 tr/min pour P, V et w respectivement. Les valeurs maximales pour la profondeur durcie (haut et bas) ont été obtenues dans l'essai 8 en utilisant 2300 W, 0,35 mm / s et 3000 tr/min pour P, V et w respectivement [10]. La figure 25 montre la profondeur durcie obtenue par la simulation pour les tests 3 et 8.

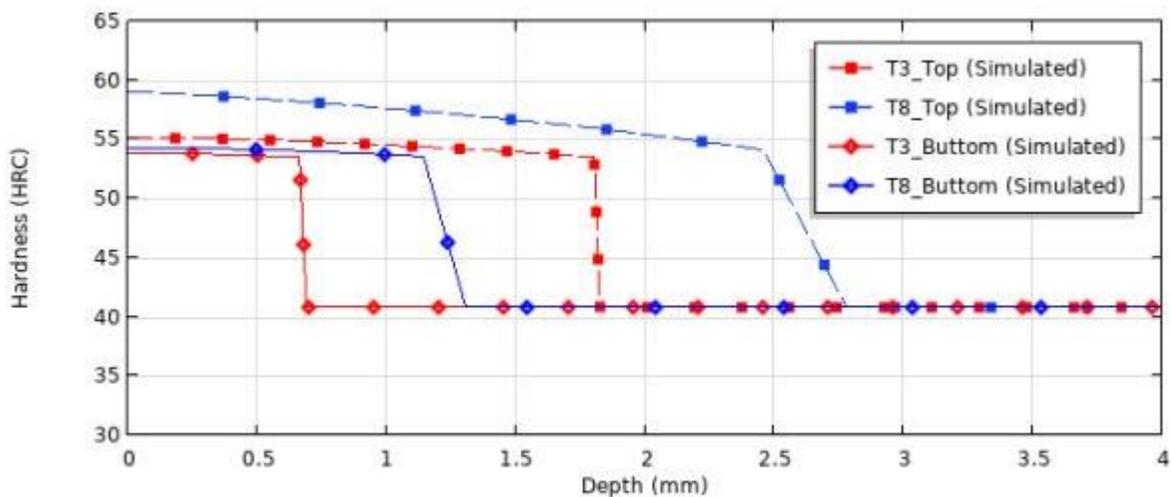


Figure 25: Résultats de simulation pour les tests T8 et T3

Une profondeur de 2.45 mm est obtenue au sommet de la dent et une profondeur de 1.15 mm au pied de la dent pour le test 8. Pour le test 3, la profondeur atteinte est de 1.8 mm au sommet et 0.71 mm au pied de la dent.

#### 4.2 VALIDATION DU MODÈLE 3D

La figure 26 montre les écarts relatifs pour la profondeur durcie sur le sommet de la dent entre les mesures pratiques et les résultats de la simulation pour les tests T1, T4 et T9. Pour les tests T1 et T9, l'erreur relative varie entre 2.27 % et 4.32%. L'erreur relative pour le test 4 est 0.63%. La figure 27 représente les écarts relatifs pour la profondeur durcie au pied de la dent entre les mesures pratiques et les résultats de la simulation pour les tests T1, T4 et T9, où L'erreur relative varie entre 3% et 5.43%. La figure 28 montre les écarts relatifs de la profondeur durcie au sommet de dent entre les mesures expérimentales et les résultats de simulation des tests T3 et T8. L'erreur relative varie entre 2.04% et 2.77%.

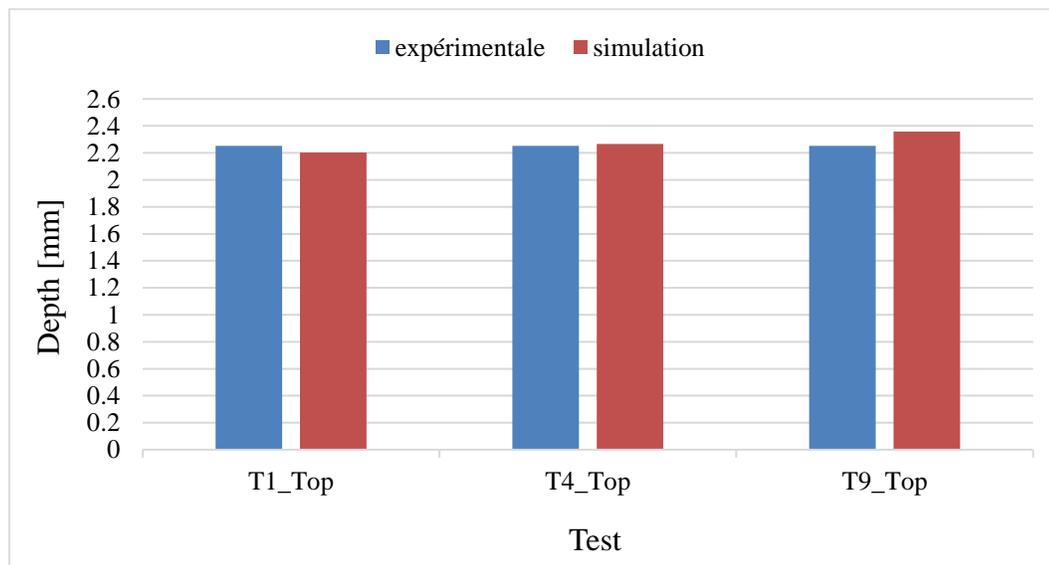


Figure 26: Validations expérimentale de la profondeur durcie au sommet de la dent pour les tests T1, T4 et T9

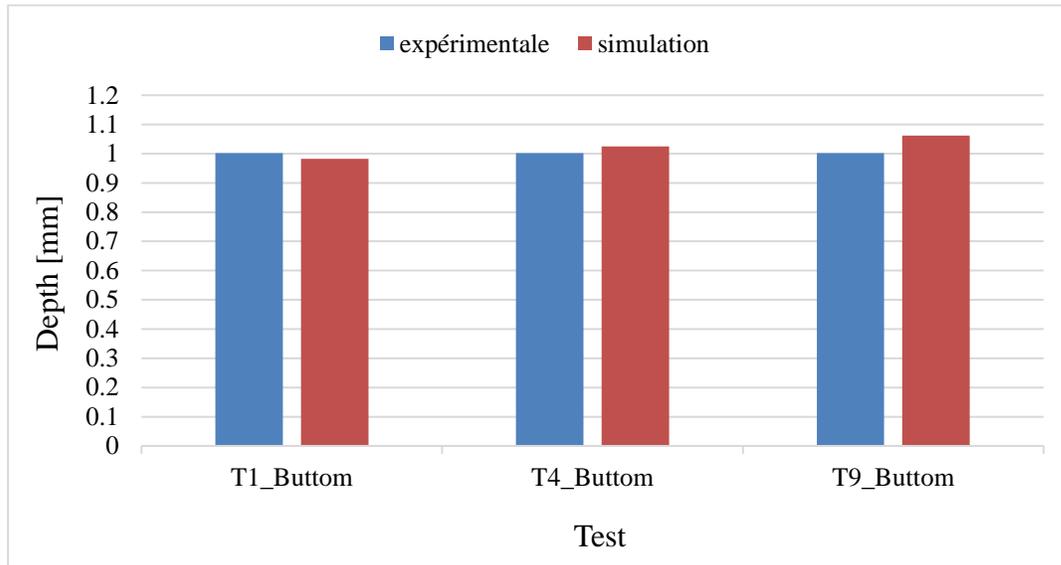


Figure 27: Validations expérimentale de la profondeur durcie au pied de la dent pour les tests T1, T4 et T9

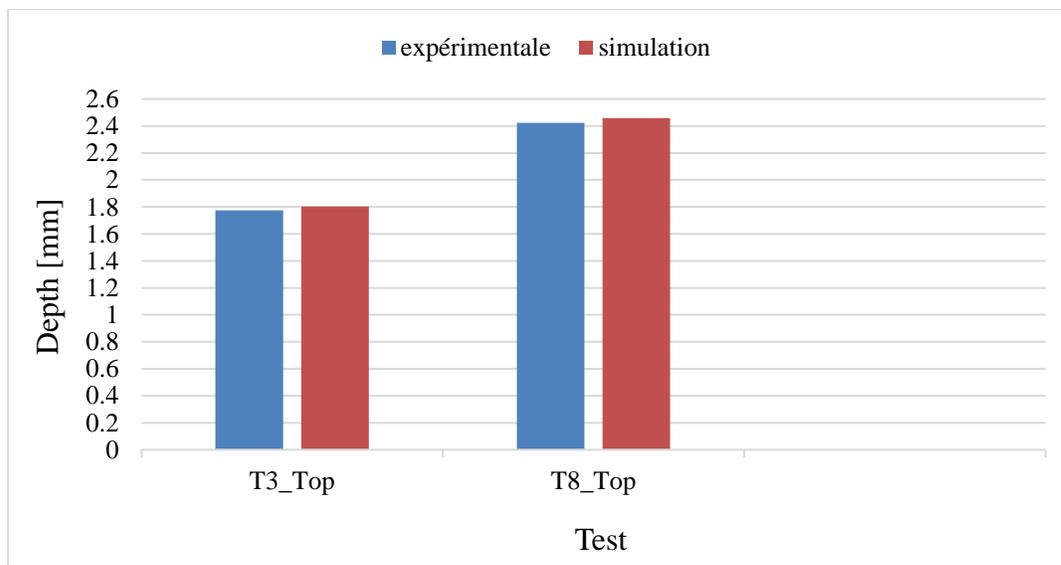


Figure 28: Validations expérimentale de la profondeur durcie au sommet de la dent pour les tests T3 et T8

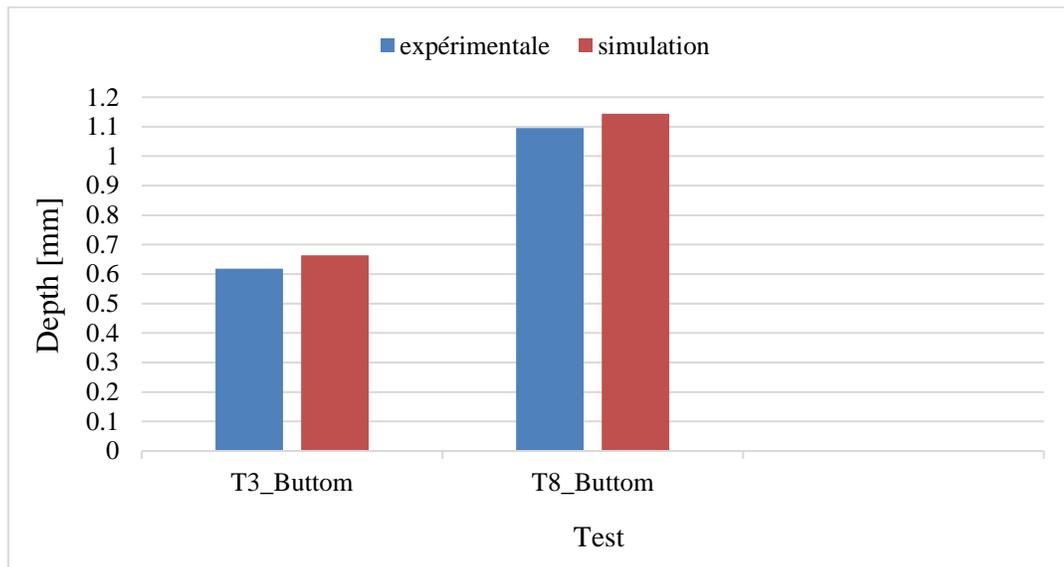


Figure 29: Validations expérimentale de la profondeur durcie au pied de la dent pour les tests T3 et T8

L'erreur relative de la profondeur durcie au sommet de la dent entre les mesures expérimentales et les résultats de simulation pour les tests T3 et T8 est respectivement 5.97% et 4.03% (voir figure 29).

Cette étude montre qu'il est actuellement possible de modéliser numériquement le processus de durcissement superficiel par laser des matériaux à l'aide d'un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis. Bien que la modélisation soit longue à mettre en œuvre en raison du grand nombre de paramètres, le modèle est précis et fiable, montrant un accord remarquable entre les prédictions et les mesures expérimentales.

En comparaison avec les résultats expérimentaux, les résultats obtenus par la simulation sont proches de la réalité avec des profils de dureté simulés et réels presque identiques. La simulation a également montré que, par ce procédé, le sommet de la dent est toujours traité plus profondément que la racine. D'autre part, en raison de la géométrie complexe et du mouvement de rotation rapide, le temps de simulation a considérablement augmenté en raison de la grande quantité de données générées.

### 4.3 ANALYSE DE LA VARIANCE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Cette partie traite de l'évaluation de l'influence des paramètres du système (puissance de laser, vitesse de balayage et la vitesse de rotation) et leurs interactions sur la profondeur durcie. Les expériences sont simulées à l'aide d'un modèle 3D avec le logiciel COMSOL. L'analyse de la variance (ANOVA) est un outil essentiel pour déterminer la signification d'un effet spécifique ou d'un modèle mathématique. La réponse du modèle est la profondeur de durcissement obtenue par la simulation numérique au sommet et au pied de la dent. Le principe de l'analyse de la variance est basé sur le calcul de la différence globale entre les résultats des expériences modélisées et la moyenne de ces mesures.

L'ANOVA est une technique de calcul utilisée pour estimer l'importance relative de chaque paramètre du processus en fonction de sa contribution en pourcentage à la réponse globale. Les paramètres dont le pourcentage de contribution est le plus élevé sont considérés de la plus haute importance dans l'expérience et ont également des effets significatifs sur le contrôle de la réponse globale [7]. Un plan orthogonal de Taguchi L27 de 3 facteurs à 3 niveaux a été choisi (Tableau 13).

La figure 30 montre que la profondeur de durcissement au sommet de la dent est affectée à des degrés divers par les paramètres du processus. Le facteur qui affecte le plus la profondeur de durcissement est la puissance du laser (P), tandis que la vitesse de balayage (V) et la vitesse de rotation (w) ont moins d'effet. On peut observer que plus la puissance P augmente, plus la profondeur de durcissement est importante. Cependant, la profondeur de trempe diminue à mesure que les vitesses V et w augmentent.

Les résultats de l'analyse ANOVA présentés dans le tableau 14, montrent que les facteurs (P, V et w) ont une p-valeur égale à zéro, ce qui confirme l'importance de ces trois paramètres pour influencer la profondeur de durcissement simulée.

Tableau 13: Planification expérimentale des simulations (L27)

| Facteur  | Niveau |      |      |
|----------|--------|------|------|
| <b>P</b> | 1900   | 2100 | 2300 |
| <b>V</b> | 0.25   | 0.35 | 0.45 |
| <b>w</b> | 3000   | 3500 | 4000 |

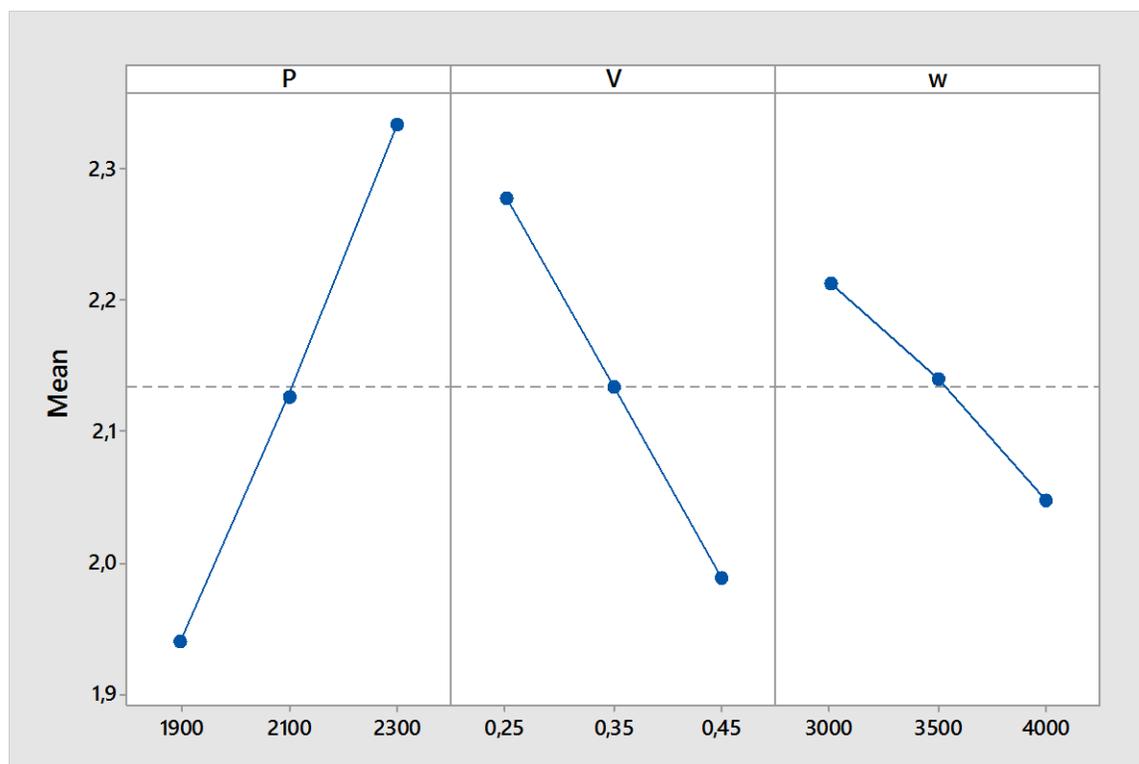


Figure 30: Effet des paramètres du processus de traitement sur la profondeur durcie au sommet de la dent

Ces résultats sont confirmés par l'effet moyen de chaque paramètre en termes de pourcentage de contribution à la variation de la profondeur de durcissement au sommet de la dent (voir tableau 14), où l'on peut observer que les contributions cumulées des trois paramètres représentent plus de 96%. P est la variable la plus importante avec l'effet le plus

important (56,60%). V est le deuxième paramètre le plus important avec 30,45%, et w est le paramètre le moins important avec l'effet le plus faible (9,91%). La contribution des interactions entre les trois paramètres est moins importante, représentant environ 2,22 %. Cependant, il est surprenant que les interactions P et V aient un effet moins important avec environ 1,04%, avec une contribution d'erreur de 0,82%.

Tableau 14: Analyse ANOVA pour la profondeur durcie du sommet de la dent

| <b>Caractéristiques</b> | <b>Somme des carrés</b> | <b>Seq MS</b> | <b>Contribution (%)</b> | <b>F-Value</b> | <b>p-Value</b> |
|-------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|----------------|----------------|
| <b>P</b>                | 0.69644                 | 0.348220      | 56.60                   | 274.76         | 0.000          |
| <b>V</b>                | 0.37468                 | 0.187341      | 30.45                   | 247.82         | 0.000          |
| <b>w</b>                | 0.12196                 | 0.060979      | 9.91                    | 48.12          | 0.000          |
| <b>P.V</b>              | 0.01276                 | 0.003189      | 1.04                    | 2.52           | 0.124          |
| <b>P.w</b>              | 0.01018                 | 0.002546      | 0.83                    | 2.01           | 0.186          |
| <b>V.w</b>              | 0.00429                 | 0.001072      | 0.35                    | 0.85           | 0.534          |
| <b>Erreur</b>           | 0.01014                 | 0.001267      | 0.82                    |                |                |
| <b>Total</b>            | 1.23044                 |               | 100                     |                |                |

Pour la partie inférieure de la dent, les observations sont presque les mêmes. La figure 31 montre les effets moyens des paramètres du processus sur la profondeur de durcissement à l'extrémité de la dent. Une fois encore, le facteur qui influence le plus la profondeur durcie est en effet la puissance du laser (P). Vient ensuite la vitesse de balayage (V), puis la vitesse de rotation (w), qui a moins d'effet. D'après les résultats, l'augmentation de la puissance (P)

entraîne une augmentation de la profondeur durcie au sommet de la dent. Cependant, elle diminue avec l'augmentation de (V) et (w).

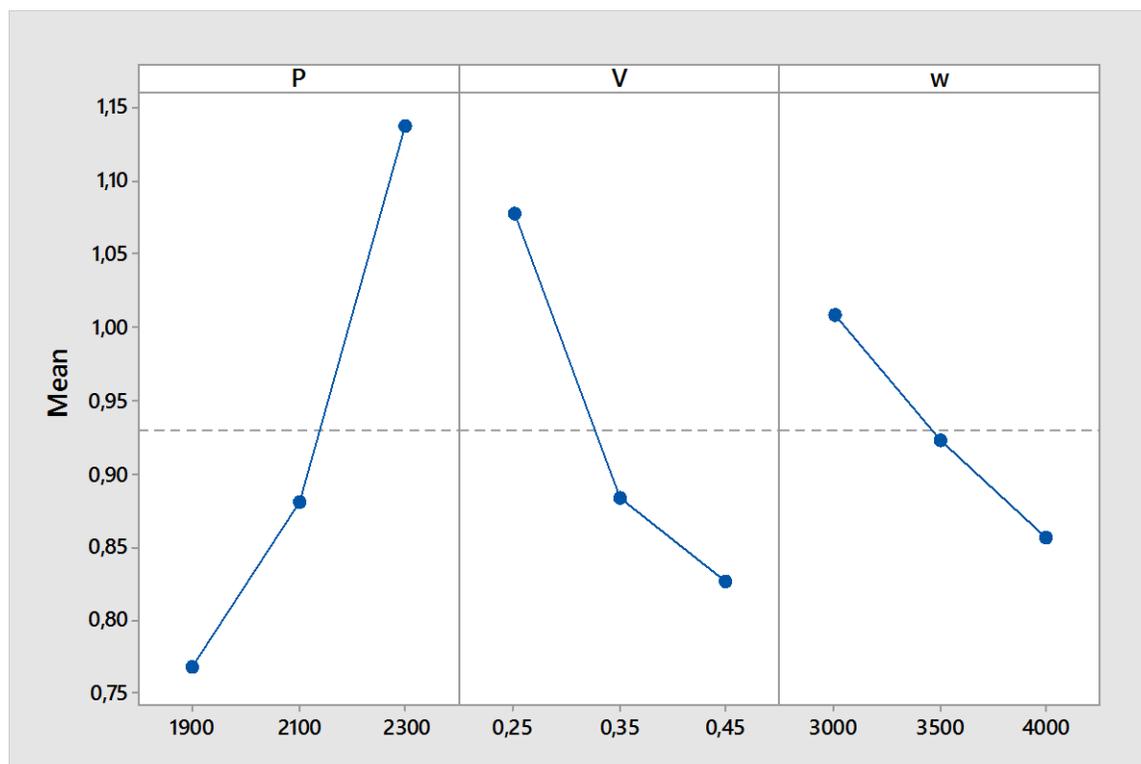


Figure 31: Effet des paramètres du processus de traitement sur la profondeur durcie au pied de la dent

Ces observations sont confirmées par l'analyse ANOVA présentée dans le tableau 15. L'on peut voir que la contribution de la puissance du laser (P) est la variable qui présente l'effet le plus important 58,81%, la vitesse de balayage (V) est le deuxième paramètre le plus important avec une contribution de 28,55% et enfin la vitesse de rotation (w) est le paramètre le moins influent avec une contribution de 9,61%.

Tableau 15: Analyse ANOVA pour la profondeur durcie au pied de la dent

| <b>Caractéristiques</b> | <b>Somme des carrés</b> | <b>Seq MS</b> | <b>Contribution (%)</b> | <b>F-Value</b> | <b>p-Value</b> |
|-------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|----------------|----------------|
| <b>P</b>                | 0.64435                 | 0.322173      | 58.81                   | 360.22         | 0.000          |
| <b>V</b>                | 0.31280                 | 0.156399      | 28.55                   | 174.87         | 0.000          |
| <b>w</b>                | 0.10530                 | 0.105301      | 9.61                    | 58.87          | 0.000          |
| <b>P.V</b>              | 0.01270                 | 0.012698      | 1.16                    | 3.55           | 0.060          |
| <b>P.w</b>              | 0.01046                 | 0.010465      | 0.96                    | 2.93           | 0.092          |
| <b>V.w</b>              | 0.00288                 | 0.002884      | 0.26                    | 081            | 0.555          |
| <b>Erreur</b>           | 0.00715                 | 0.007155      | 0.65                    |                |                |
| <b>Total</b>            | 1.23044                 |               | 100                     |                |                |

En effet, ces trois paramètres peuvent jouer un rôle important dans l'obtention d'une profondeur de durcissement précise en haut et en bas de la dent du pignon. Les résultats montrent que les contributions de ces paramètres sont supérieures à 95%. En outre, il existe une forte corrélation entre les profondeurs de trempe du haut en bas.

Les résultats montrent qu'il y a concordance entre mesures et estimations de la profondeur durcie au sommet de la dent. L'étude expérimentale montre une contribution de 52,92% pour la puissance du laser, 20,04% pour la vitesse de balayage et 11,27% pour la vitesse de rotation. Au pied de la dent, les choses ne diffèrent pas beaucoup, puisque les résultats indiquent une contribution de 52,08 % pour la puissance du laser, de 18,75 % pour la vitesse de balayage et enfin de 10,08 % pour la vitesse de rotation. A partir de ces résultats,

il est possible de dire qu'il y a une concordance entre les résultats de l'expérience et ceux de la simulation. Ainsi, le modèle donne une profondeur durcie qui correspond presque à la profondeur obtenue dans l'expérience.

À noter que le type et la taille du maillage peuvent affecter l'estimation de la profondeur durcie et impacter la qualité des prédictions. A noter également qu'une variation des propriétés des matériaux utilisés dans le modèle de simulation, telles que la chaleur spécifique et la conductivité thermique, peut affecter l'estimation de la profondeur durcie.



## **CHAPITRE 5**

### **MODELISATION PREDICTIVE**

#### **5.1 INTRODUCTION**

Ce chapitre traite du développement d'un modèle permettant de prédire les profondeurs durcies au sommet et au pied de la dent d'une roue dentée en fonction des conditions de chauffage dans le procédé de traitement thermique au laser. Le modèle proposé permet de remédier de façon substantielle aux problèmes que pose la prédiction à l'aide de modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis. Le modèle proposé est susceptible de d'apporter des gains appréciables aussi bien en termes de précision, de temps que de coût.

De façon générale, quand on dispose de bases théoriques suffisantes pour établir le modèle de comportement d'un système, le problème de modélisation est immédiatement résolu par l'intégration des variables du système sous la forme suggérée par le modèle analytique. Si la base théorique pour l'établissement du modèle n'est pas connue, la description du comportement du système à l'aide d'un modèle empirique nécessite la recherche et l'établissement de relations de cause à effet entre ce comportement et les conditions internes et externes du système. Dans le processus d'élaboration de ces relations, deux aspects d'importance doivent être considérés.

Le premier concerne la sélection de la forme fonctionnelle du modèle. Cet aspect du processus se rattache principalement au choix de la technique de modélisation en rapport avec la complexité du comportement du système. Le choix se traduit le plus souvent par la recherche du formalisme mathématique du modèle en tenant compte des variables sans aucune considération à leurs effets réels sur le comportement du système. Les effets en question peuvent se rapporter aussi bien à la contribution des variables dans la description du système qu'aux bruits et incertitudes qu'elles peuvent introduire. Le second,

complémentaire au premier, concerne la détermination des paramètres d'ajustement du modèle. Cet aspect du processus se rattache aux techniques et aux algorithmes utilisés pour l'identification et l'optimisation des paramètres du modèle.

Bien que ces deux problèmes soient étroitement liés, elles entraînent différents types d'erreurs de modélisation. Les erreurs de non-concordance du modèle proviennent du fait que la forme fonctionnelle du modèle ne permet pas de reproduire la complexité du comportement du procédé représentée par les données et les erreurs d'estimation du modèle qui proviennent d'une mauvaise évaluation des paramètres du modèle. La diminution d'un type d'erreur peut souvent conduire à l'augmentation de l'autre type. C'est ce qu'on peut qualifier de compromis entre le biais et la variance comme le montre la figure 32.

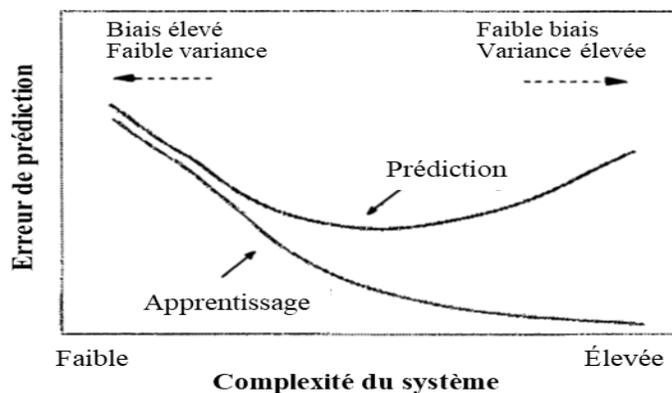


Figure 32: Nature des erreurs en fonction de la complexité du procédé

## 5.2 MODÉLISATION PAR RÉSEAUX DE NEURONES

Le développement d'un système prédictif nécessite des modèles permettant de représenter de façon précise les relations de cause à effet entre d'une part les paramètres géométriques de la pièce à traiter et des paramètres de chauffage et d'autre part, les profondeurs durcies. En l'absence de modèles analytiques capables de représenter ces relations, seuls des modèles obtenus sur la base de données issues de l'observation, de

l'expérimentation ou de la simulation peuvent être utilisés pour développer le système prédictif désiré. Ce type de modèles empiriques sont plus simples et moins coûteux à établir que les modèles analytiques.

Ils sont utilisés pour des applications dans de nombreux domaines : marketing, ventes, finances et sciences de la santé, ingénierie, etc. La modélisation par réseaux de neurones (RN) est une approche de modélisation empirique parmi les plus populaires au cours des dernières années. Plusieurs applications ont montré de façon claire le potentiel de cette technique de modélisation [29, 30].

Cette technique nécessite une phase initiale d'entraînement dans laquelle des relations appropriées entre les variables dépendantes et les variables indépendantes sont établies. Cette phase utilise des données dans lesquelles on retrouve un ensemble de conditions d'entrées (variables indépendantes) pour lesquelles les valeurs des sorties (les variables dépendantes) sont connues. Après la phase d'entraînement, le modèle obtenu est appliqué directement pour la prédiction. Dans ce cas, les entrées représentant les conditions de fonctionnement du procédé sont la puissance ( $P$ ), la vitesse de déplacement de la source laser ( $V$ ) et la vitesse de rotation de la pièce ( $w$ ). Les sorties sont la profondeur durcie au sommet de la dent (PDS) et la profondeur durcie au pied de la dent (PDP).

Un réseau neuronique est un modèle de type connexionniste composé d'un ensemble de processeur opérant en parallèle dans lequel chaque processeur exécute une fonction neurale simplifiée. Les informations sont stockées dans les poids des connexions entre processeurs et les écarts associés à chaque processeur. Durant la phase d'apprentissage, la représentation des relations entre l'estimé et les estimateurs est développée en adaptant les poids des connexions et les écarts selon un algorithme bien défini. Une telle méthode de modélisation a été appliquée dans de nombreux domaines. Son succès réside dans son potentiel à performer dans des applications de pilotage et de commande en temps réel et surtout à produire de bonne approximation même à partir d'informations incomplètes et hautement contaminées par le bruit.

Dans cette application, le perceptron multicouche semble être le modèle neuronique le plus approprié. Tel qu'illustré dans la figure 33, dans ce type réseau, chaque neurone représente un modèle non linéaire.  $O_j$  est la sortie du neurone courant  $j$ ,  $O_i$  est la sortie d'un neurone de la couche précédente  $i$ ,  $\theta_j$  est l'écart associé au neurone  $j$  et  $W_{ij}$  représente le poids de la connexion entre les neurones  $i$  et  $j$ .

Les poids  $W_{ij}$  et les écarts  $\theta_j$  sont obtenus en utilisant une procédure d'optimisation basée sur l'algorithme de quasi-Newton. Cette procédure consiste à minimiser la somme quadratique des erreurs  $SSE$  entre la sortie estimée par le réseau  $Sei$  et la sortie désirée  $Sdi$  à travers les  $n$  points d'entraînement. L'évaluation des paramètres du modèle neuronique est effectuée à travers tous les points d'entraînement pour toutes les sorties.

La capacité de prédiction ou d'estimation d'un réseau neuronique est conditionnée par son architecture. Le nombre d'entrées au réseau, le nombre de ses sorties ainsi que le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chacune des couches déterminent les limites du réseau en termes de complexité des formes à modéliser. Des architectures de type  $P \times Q \times S$  représentent des réseaux à 3 couches ayant  $P$  entrées,  $Q$  neurones dans la couche cachée et  $S$  sorties.

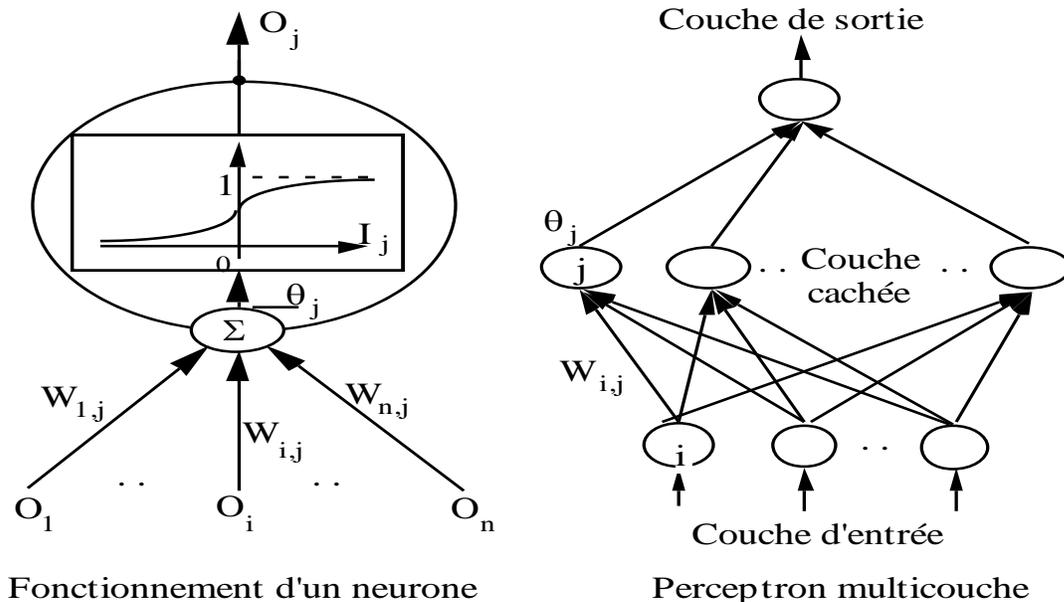


Figure 33: Structure générale d'un perceptron multicouche

### 5.3 ÉVALUATION DU MODÈLE

D'autre part, le souci de générer des modèles capables d'effectuer des prédictions avec des erreurs minimales suggère de tester les modèles non pas seulement sur les données qui ont servi à leur élaboration mais sur des données supplémentaires pour s'assurer de leurs capacités de généralisation. La base de données qui va servir au développement du modèle prédictif est générée par simulations selon un plan factoriel complet de 3 facteurs ayant à cinq niveaux chacun. Dans le but d'évaluer les performances du modèle prédictif, des données n'ayant pas servies dans la phase d'apprentissage doivent être utilisées dans la phase de validation du modèle. Il est connu que les erreurs d'apprentissage sont souvent inférieures aux erreurs de validation. Pour ce faire, une méthode de validation adaptée est adoptée pour une évaluation plus efficace des performances du modèle. Cette méthode est composée de deux volets. Le premier volet consiste à diviser les 125 combinaisons de données disponibles en 5 segments différents contenant 25 combinaisons chacun. Les 25 combinaisons dans chaque segment sont échantillonnées à partir de la base de données de façon aléatoire. Le modèle est alors entraîné à l'aide 100 combinaisons provenant de 4 des 5 segments disponibles. Une première validation est réalisée à l'aide du segment restant. Le second volet consiste à utiliser des résultats expérimentaux. Pour cela, 17 combinaisons provenant de deux matrices  $L_9$  et  $L_8$  sont utilisés pour la seconde validation.

En général, dans l'analyse de la précision des modèles, la formulation des critères dépend essentiellement des hypothèses sur lesquelles on s'est basé pour établir ces modèles. L'une des hypothèses qui revêt un caractère important est celle associée à la nature des variables. Quand les variables sont non stochastiques et mesurées sans erreurs, l'analyse de la précision du modèle qui les relie peut être effectuée en utilisant des règles statistiques conventionnelles (*ANOVA* par exemple). Mais si l'hypothèse en question n'est pas vérifiée, c'est-à-dire que les variables sont sujettes à des erreurs de mesure, l'évaluation du modèle devient un peu plus complexe. Les erreurs introduites dans les variables peuvent provenir de différentes sources surtout si ces variables ne sont pas contrôlées lors des expérimentations.

La connaissance du processus, le choix de techniques et des instruments de mesure les plus adéquats combinés à une planification structurée de la modélisation permettent de conduire à des modèles prédictifs relativement précis. Le choix des critères appropriés permet d'approfondir l'analyse et générer des informations utiles qui facilitent la formulation d'un compromis entre la précision et la robustesse du modèle. L'évaluation de l'erreur quadratique seule ne constitue pas une indication claire sur la capacité de prédiction des modèles obtenus. Des critères supplémentaires doivent être intégrés dans l'analyse pour évaluer les performances des modèles.

À partir de ces considérations, cinq critères ont été utilisés pour raffiner la modélisation. Ces critères sont : la déviation moyenne absolue (Mean Absolute Error : MAE), le pourcentage moyen de l'erreur absolue (Mean Absolute Percent Error : MAPE), l'erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error : MSE), la racine de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Squared Error : RMSE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de prédiction. Ces critères sont appliqués aux modèles aussi bien dans la phase modélisation que dans la phase prédiction pour tester les modèles et pour analyser et comparer leurs performances dans les différentes procédures de validations croisées. Les cinq critères sont définis par les relations suivantes :

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (16)$$

$$\text{MAPE} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \right) \times 100\% \quad (17)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (18)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (19)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (20)$$

## 5.4 APPLICATION

La base de données qui va servir au développement du modèle prédictif est obtenu par simulation numérique utilisant la méthode des élément finis. Le modèle numérique utilisé a été préalablement validé à l'aide de résultats expérimentaux. Lors de cette validation, la concordance entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux est supérieure à 95%. Le modèle numérique est par la suite utilisé pour de générer toutes les données nécessaires au développement du modèle prédictif. La validation du modèle est basée sur des résultats expérimentaux.

Les données de simulation ont été produites selon un plan factoriel complet de 3 facteurs ayant à trois niveaux chacun pour former une matrice factorielle de 27 combinaisons. Les données expérimentales proviennent de la combinaison de deux matrices orthogonales L<sub>9</sub> et L<sub>8</sub>. Les facteurs et les niveaux utilisés dans chacun des cas sont résumés dans le tableau 16. Le plan d'expérience qui correspond à ce type de problème est une matrice L<sub>27</sub>. Cela permet de générer 27 combinaisons différentes.

Tableau 16: Facteurs et niveaux pour la modélisation et pour la validation

|            |            |      |      |      |
|------------|------------|------|------|------|
|            | P (W)      | 1900 | 2100 | 2300 |
| <b>L27</b> | V (mm/s)   | 0.25 | 0.35 | 0.45 |
|            | w (tr/min) | 3000 | 3500 | 4000 |
|            | P (W)      | 1900 | 2100 | 2300 |
| <b>L9</b>  | V (mm/s)   | 0.25 | 0.35 | 0.45 |
|            | w (tr/min) | 3000 | 3500 | 4000 |
|            | P (W)      | 2000 | 2200 |      |
| <b>L8</b>  | V (mm/s)   | 0.3  | 0.4  |      |
|            | w (tr/min) | 3250 | 3750 |      |

Le modèle est alors entraîné en utilisant les 27 combinaisons issues de la simulation (Apprentissage) et testé par les 17 combinaisons issues de l'expérimentations (Validation). Pour rappel, les entrées aux modèles sont : la puissance (P), la vitesse de déplacement de la source laser (V) et la vitesse de rotation de la pièce (w). Les sorties sont : la profondeur durcie au sommet de la dents (PDS) et la profondeur durcie au pied de la dent (PDP).

Les tableaux 17 ainsi que les figures 34 à 37 présentent les performances de l'ensemble des modèles issues des différentes procédures de modélisation et de validation. Bien que la qualité du modèle semble très bonne dans l'ensemble en consultant le niveau de  $R^2$ , qui varie entre 96 et 99% durant l'apprentissage et entre 93 et 95% lors du test du modèle, cerner de façon plus précise le niveau de performance du modèle aussi bien au niveau de la modélisation qu'au niveau de la prédiction nécessite l'analyse des autres critères d'évaluation.

De façon générale, le modèle semble donner de meilleurs résultats pour PDP que pour PDS. Cela est probablement due aux plus grandes incertitudes de mesure de la profondeur durcie au pied de la dent. Les performances du modèle sont très proches pour les deux sorties PDS et PDP à cause de la forte corrélation qui les lie. Le tableau 17 donne une idée claire sur le niveau des performances entre la phase modélisation et la phase prédiction.

Tableau 17: Comparaison des performances du modèle en phase apprentissage et en phase prédiction

| Phases              |               | Sorties | MAE   | MAPE  | MSE   | $R^2$  | RMSE  |
|---------------------|---------------|---------|-------|-------|-------|--------|-------|
| <b>Modélisation</b> | Apprentissage | PDS     | 0.080 | 3.70% | 0.013 | 96.45% | 0.114 |
|                     |               | PDP     | 0.047 | 5.88% | 0.004 | 99.11% | 0.064 |
| <b>Prédiction</b>   | Validation    | PDS     | 0.127 | 5.75% | 0.025 | 93.90% | 0.158 |
|                     |               | PDP     | 0.051 | 9.05% | 0.007 | 95.79% | 0.084 |

Une comparaison rapide du niveau de performance du modèle entre la phase modélisation et la phase prédiction révèle des variations dans les valeurs des critères. Cela s'explique par le fait que la phase prédiction utilise des données qui n'ont pas servies à l'établissement des modèles. Il est donc normal d'observer de telles variations. A titre d'exemple, le critère MAE passe entre les phases modélisation et prédiction de 3.70% et 5.88% à 5.75 et 9.05% respectivement pour PDS et PDP. Les autres critères présentent des variations sensiblement les mêmes variations que MAE. À noter également que dans la phase prédiction, on observe une légère différence dans les performances du modèle selon que l'on utilise les données issues de la L8 ou de la L9.

Ces résultats sont confirmés par les courbes des figures 34 à 37 qui présentent les dispersions issues de la comparaison des profondeurs cibles et des profondeurs prédites par le modèle. Les figures 38 et 39 proposent des représentations des dispersions observées lors de la modélisation et de la prédiction.

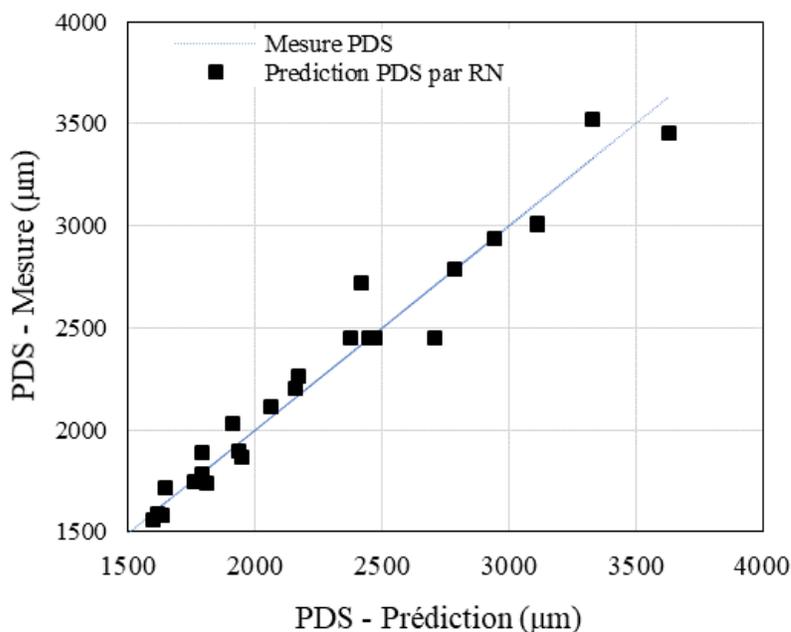


Figure 34: Performances du modèle pour PDS lors la phase apprentissage

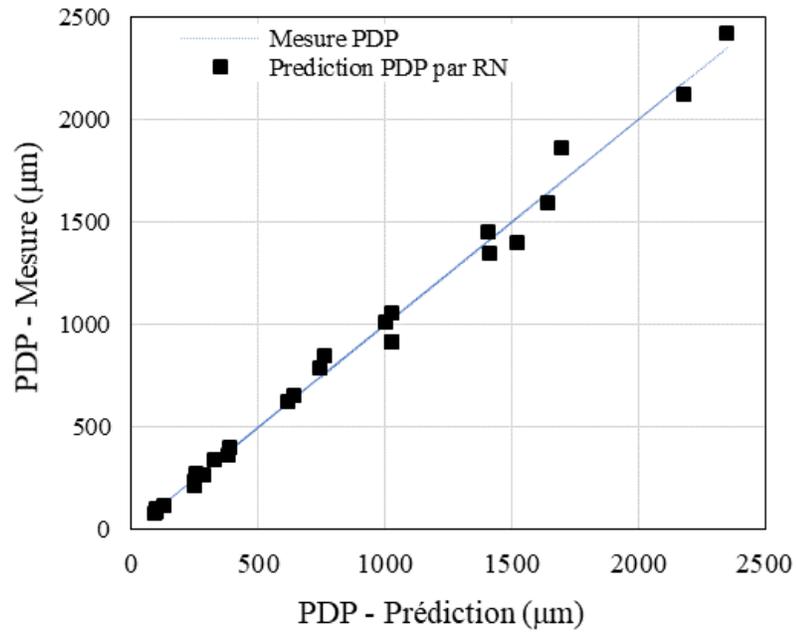


Figure 35: Performances du modèle pour PDP lors la phase apprentissage

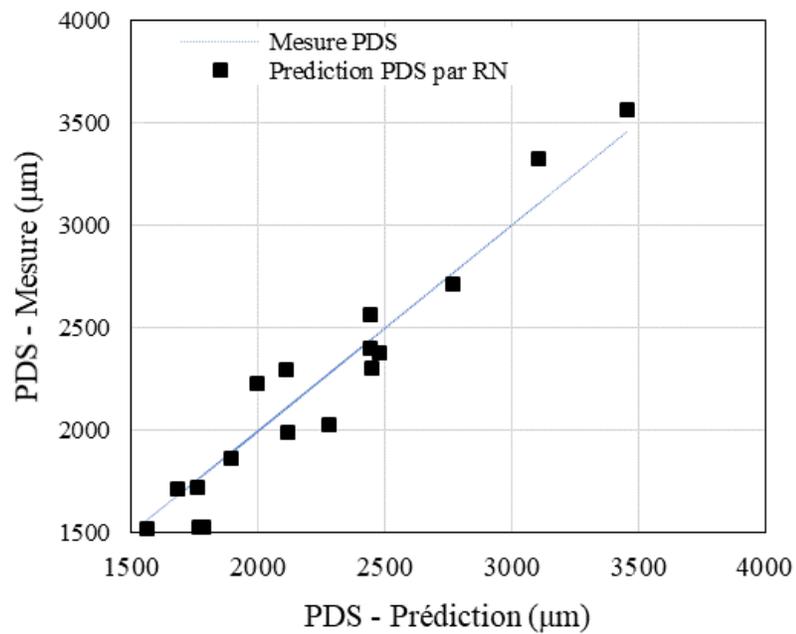


Figure 36: Performances du modèle pour PDS lors la phase Validation

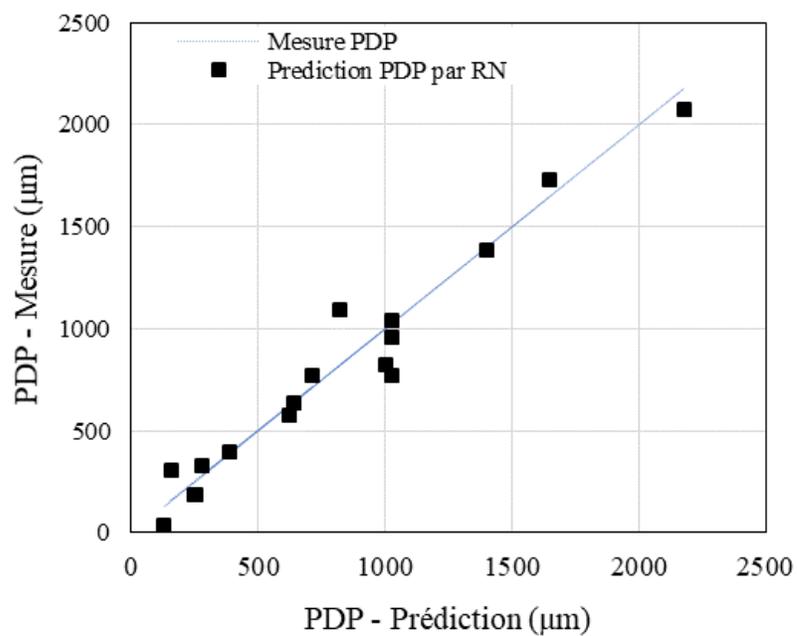


Figure 37: Performances du modèle pour PDP lors la phase Validation

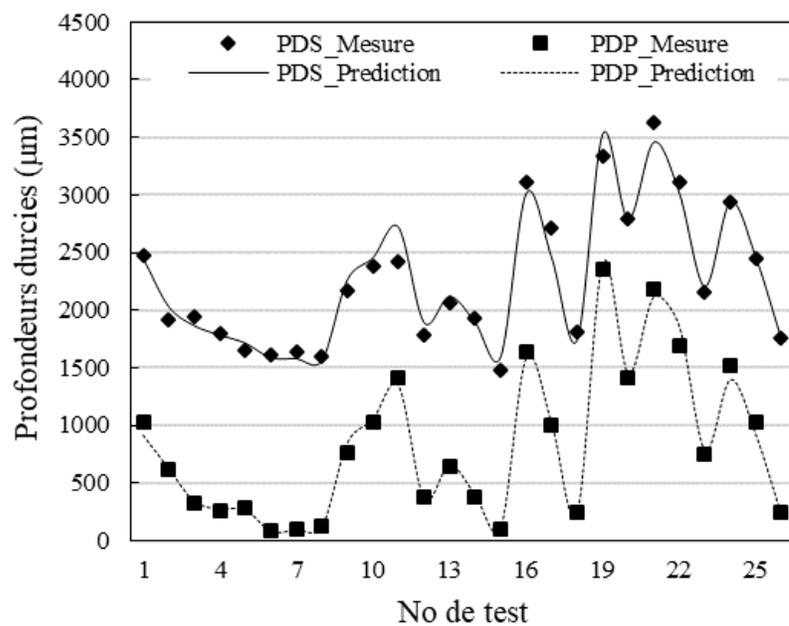


Figure 38: Performances globales du modèle en phase apprentissage

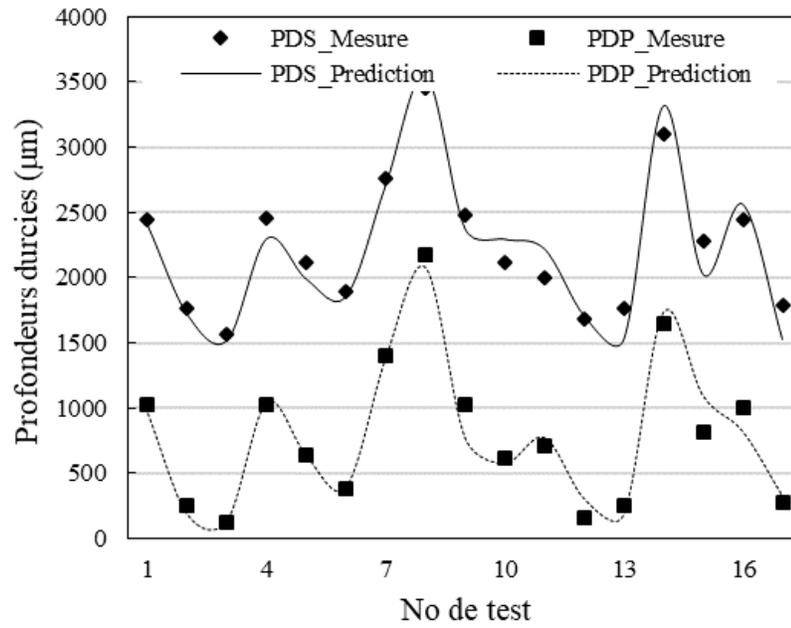


Figure 39: Performances globales du modèle en phase prédiction

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail est de développer un modèle capable de prédire le profil de dureté et la profondeur durcie sur un engrenage en acier 4340 ayant subi un traitement thermique de surface par laser. Plus spécifiquement, le projet a conduit (i) au développement d'un modèle numérique 3D capable de simuler le comportement du procédé et à sa validation expérimentale, (ii) à la réalisation d'une campagne de simulations selon une planification structurée dans le but de mener une analyse statistique approfondie des effets de chaque paramètre du procédé sur la variation du profil de dureté et de la profondeur durcie, (iii) à la production de la base de données nécessaire à l'établissement d'un modèle prédictif à base de réseaux de neurones, et finalement (iv) à la conception, au développement et à la validation du modèle prédictif.

Tout d'abord, un modèle 3D basé sur la méthode des éléments finis a été développé à l'aide du logiciel COMSOL. L'intégration des équations de transformations métallurgique dans le modèle thermique a permis de convertir les données de distribution spatio-temporelle de la température afin de prédire le profil de dureté et la profondeur de durcissement au sommet et au pied des dents de l'engrenage. Le modèle a été validé par des données expérimentales obtenues selon un design expérimental orthogonal ( $L_9$ ). Les profondeurs durcies obtenues par simulation ont été comparées à celle obtenue à partir des expériences. Cette comparaison montre une grande concordance dans les résultats avec des déviations inférieures à 6%. Il est cependant à noter qu'étant donnée la complexité du modèle numérique, le temps de calcul est relativement élevé.

Suite à la validation du modèle numérique, un plan de simulation basé sur un design factoriel ( $L_{27}$ ) a été adopté pour étudier l'effet des trois paramètres considérés dans la simulation et de leurs interactions sur la profondeur de durcissement. Une analyse de la

variance (ANOVA) a été réalisée à cet effet. La puissance du laser, la vitesse de balayage et la vitesse de rotation font partie des facteurs considérés comme variables contribuant à la variation de la profondeur de durcissement. Les résultats ont montré que tous les facteurs considérés ont un effet, mais à des degrés divers. En effet, la profondeur durcie augmente avec l'augmentation de la puissance laser, tandis que l'augmentation de la vitesse de balayage et de la vitesse de rotation diminue la profondeur. La contribution de la puissance de laser sur la profondeur durcie est de 56.60% en tête de la dent d'engrenage et de 58.81% au pied de la dent. En revanche, la contribution de la vitesse est plus faible, soit 30.45% au sommet et 28.55% en bas de la dent. La contribution de la vitesse de rotation est de 9.91% au sommet de la dent et de 9.61% en bas. L'interaction entre les paramètres a montré une contribution inférieure à 3%.

Les performances du modèle numérique en termes de précision l'on qualifié pour être la base d'une partie des données qui vont servir au développement du modèle prédictif à base de réseaux de neurones. Ainsi, une base de données combinant données de simulation (L27) et données expérimentales (L<sub>9</sub> + L<sub>8</sub>) a servi à l'entraînement et à la validation du modèle neuronique proposé pour la prédiction. Le modèle en question a comme entrées : la puissance (P), la vitesse de déplacement de la source laser (V) et la vitesse de rotation de la pièce (w), et comme sorties : la profondeur durcie au sommet de la dent (PDS) et la profondeur au pied de la dent (PDP).

La qualité de prédiction du modèle semble être très bonne dans l'ensemble, avec un R<sup>2</sup> allant de 96 à 99% durant l'apprentissage et de 93 à 95% lors du test du modèle. Globalement, les performances du modèle permettent de prédire efficacement les profondeurs durcies au sommet et au pied de la dent avec une incertitude globale inférieure à 10 %.

Bien que ces résultats soient très satisfaisants, des investigations numériques et expérimentales additionnelles sont souhaitables pour enrichir les données disponibles et couvrir plus de conditions ainsi qu'une amélioration de la procédure de modélisation peuvent conduire certainement à un modèle prédictif plus précis et plus robustes. Les résultats

obtenus lors de ce projet suggèrent qu'il est possible de réduire les erreurs de modélisation et de prédiction à moins de 5%.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Maiman, T.H., *Stimulated optical radiation in ruby*. Nature, 1960. **187**: p. 493-494.
2. Kennedy, E., Byrne, G., and Collins, D., *A review of the use of high power diode lasers in surface hardening*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **155**: p. 1855-1860.
3. Steen, W.M. and Mazumder, J., *Laser material processing*. 2010: springer science & business media.
4. Chipman, J., *Thermodynamics and phase diagram of the Fe-C system*. Metallurgical and Materials Transactions B, 1972. **3**(1): p. 55-64.
5. Doane, D.V., *Application of hardenability concepts in heat treatment of steel*. Journal of Heat Treating, 1979. **1**(1): p. 5-30.
6. Budinski, K.G., *Surface Engineering for Wear Resistance.(Retroactive Coverage)*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1988. 420, 1988.
7. Mazumder, J., *Laser heat treatment: the state of the art*. JOM, 1983. **35**(5): p. 18-26.
8. Kannatey-Asibu Jr, E., *Principles of laser materials processing*. 2009: Wiley & Sons.
9. Grum, J., *Comparison of different techniques of laser surface hardening*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007. **24**(1): p. 17-25.
10. Borki, A.K., El Ouafi, A. and Chebak, A., *Experimental Investigation of Laser Surface Transformation Hardening of 4340 Steel Spur Gears*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019. **3**(3): p. 72.
11. Benedict, G.F. and Eskildsen, J., *Method and apparatus for laser gear hardening*. 1985, Google Patents.
12. Shercliff, H.R. and Ashby, M., *The prediction of case depth in laser transformation hardening*. Metallurgical Transactions A, 1991. **22**(10): p. 2459-2466.
13. Shiue, R. and Chen, C, *Laser transformation hardening of tempered 4340 steel*. Metallurgical Transactions A, 1992. **23**(1): p. 163-170.
14. Joerg, V. et al., *Influence of complex geometries on the properties of laser-hardened surfaces*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **107**(9-10): p. 4255-4260.

15. Altergott, W. and Patel, P., *Spur Gear Laser Surface Hardening MM/T Program*. 1982, BELL HELICOPTER TEXTRON INC FORT WORTH TX.
16. Skvarenina, S. and Shin, Y.C., *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, 2006. **201**(6): p. 2256-2269.
17. Ashby, M. and Easterling, K.E., *The transformation hardening of steel surfaces by laser beams—I. Hypo-eutectoid steels*. Acta metallurgica, 1984. **32**(11): p. 1935-1948.
18. Li, W.-B., Easterling, K.E. and Ashby, M., *Laser transformation hardening of steel—II. Hypereutectoid steels*. Acta Metallurgica, 1986. **34**(8): p. 1533-1543.
19. Davis, M., et al., *Heat hardening of metal surfaces with a scanning laser beam*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1986. **19**(10): p. 1981.
20. Mioković, T., et al., *Prediction of phase transformations during laser surface hardening of AISI 4140 including the effects of inhomogeneous austenite formation*. Materials Science and Engineering: A, 2006. **435**: p. 547-555.
21. Patwa, R. and Shin, Y.C., *Predictive modeling of laser hardening of AISI150H steels*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(2): p. 307-320.
22. Orazi, L., et al., *Laser surface hardening of large cylindrical components utilizing ring spot geometry*. CIRP Annals, 2014. **63**(1): p. 233-236.
23. Tobar, M. et al., *Laser transformation hardening of a tool steel: Simulation-based parameter optimization and experimental results*. Surface and coatings technology, 2006. **200**(22-23): p. 6362-6367.
24. Zhang, H. et al., *Surface hardening of gears by laser beam processing*. Surface engineering, 2003. **19**(2): p. 134-136.
25. Hadhri, M., A. El Ouafi, and N. Barka, *Hardness Profile Prediction for a 4340 Steel Spline Shaft Heat Treated by Laser Using a 3D Modeling and Experimental Validation*. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2016. **4**(4): p. 9-19.
26. Billaud, G., *Simulation et validation expérimentale du traitement thermique superficiel au laser appliqué à des géométries complexes*. 2016, Université du Québec à Rimouski.
27. Ion, J., *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. 2005: Elsevier.
28. Steen, W.M., *Laser cutting*, in *Laser Material Processing*. 1991, Springer. p. 69-107.
29. Huang, S.H. and Zhang, H.C., *Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications, and perspectives*. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1994. **17**(2): p. 212-228.
30. Meireles, M.R., Almeida, P.E., and Simões, M.G., *A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks*. IEEE transactions on industrial electronics, 2003. **50**(3): p. 585-601.