



MODÉLISATION ET SIMULATION DU PROCÉDÉ DE DURCISSEMENT PAR INDUCTION APPLIQUÉ À DES PIGNONS À CHAÎNE - CHAUFFAGE À DOUBLE FRÉQUENCE

Mémoire présenté
dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie
en vue de l'obtention du grade « maître ès sciences appliquées »
(M. Sc. A.)

PAR

© Ahmad Abdulsalam Mohammad Al Salkhadi

Septembre 2021

Composition du jury :

Caroline Frenette, présidente du jury, Université du Québec à Rimouski

Noureddine Barka, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Rachid Fakir, examinateur externe, Bouthillette Parizeau

Maxime Berger, professeur, Université du Québec à Rimouski

Dépôt initial le 08 Juillet 2021

Dépôt final le 15 Septembre 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.

À ma famille

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude au département de mathématiques, d'informatique et de génie de l'Université du Québec à Rimouski qui m'a soutenu et a eu un rôle significatif dans la gestion de l'environnement éducatif et exprime un grand intérêt pour les étudiants ainsi que leur orientation.

J'adresse également mes sincères remerciements et mon appréciation à l'instigateur de l'innovation et des idées brillantes qui est le directeur de mon projet de recherche en maîtrise, M. Nouredine Barka, qui a eu un grand mérite de soutenir, diriger et organiser mon projet de recherche. En effet, je fais partie des personnes très chanceuses d'avoir le professeur Barka comme directeur de mon projet qui nous a inculqué le respect, les principes et l'esprit de travail en équipe.

Je remercie également tous les étudiants de maîtrise et de doctorat du groupe de recherche du professeur Barka qui ont été ma deuxième famille à l'université.

Enfin, je remercie ma femme qui m'a soutenu et aidé tout au long de mon projet de recherche. Je remercie également ma famille et tous mes amis pour leur soutien et leurs encouragements.

RÉSUMÉ

Le durcissement par induction est l'une des applications du traitement thermique par induction qui a de larges implémentations dans l'industrie, tels que la trempe, la normalisation, le recuit. Les applications les plus courantes du traitement thermique par induction sont le durcissement, en raison de ses avantages environnementaux, qualitatifs et économiques. Dans la trempe par induction, le traitement thermique dépend principalement du phénomène électromagnétique d'effet de peau car cette caractéristique principale a fait de la trempe par induction une méthode largement appliquée, notamment dans le domaine du traitement thermique des composantes des secteurs automobile et aérospatial. Grâce au phénomène d'effet de peau, la température est générée à l'intérieur de la pièce pour créer la structure martensitique uniquement sur une profondeur donnée sans contact avec la source de chaleur. Le processus de durcissement par induction est basé sur le couplage de divers phénomènes physiques complexes (électromagnétiques, thermiques et mécaniques), qui impliquent un grand nombre de paramètres mécaniques et géométriques affectant la microstructure finale de la pièce. Les caractéristiques mécaniques de la pièce traitée par le processus de trempe par induction dépendent principalement du modèle et de la profondeur du profil de dureté, qui dépend des paramètres du processus. L'une des caractéristiques les plus importantes de la trempe par induction est la possibilité d'automatiser le processus. Les simulations ont prouvé leur capacité à décrire complètement le processus de chauffage et à ajuster les paramètres du chauffage par induction, ce qui a conduit à la diminution des erreurs dans les méthodes d'essais dans l'industrie pour atteindre la profondeur et le modèle de durcissement requis.

L'objectif de ce mémoire est de modéliser et simuler numériquement un pignon d'alliage AISI 4340 par un modèle 3D traité thermiquement. C'est le pignon ou le modèle qui est traité par induction à double fréquence séquentielle et simultanée en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) pour résoudre les problèmes électromagnétiques et de transfert de chaleur. À travers cela, ce mémoire vise à étudier l'effet de l'utilisation de l'approche double fréquence séquentielle et simultanée sur le processus de durcissement par induction pour expliquer les caractéristiques et les avantages que chaque approche ajoute au processus pour obtenir un modèle de contour uniforme du profil de dureté. Ce mémoire comprend trois sections principales basées sur une simulation numérique qui a été réalisée sur le logiciel COMSOL Multiphysics. Ce mémoire combine l'étude et l'exploration des caractéristiques et des avantages de chaque approche et l'étude de la sensibilité du profil de dureté et du modèle de la distribution finale de la température en évaluant l'effet des paramètres (le temps de chauffage, la densité de courant imposée et l'écart axial d'un concentrateur de flux au-dessus et au-dessous du pignon) sur le profil de température et sur la variation de température entre le bord et les régions centrales et la variation de température entre la pointe et la racine en utilisant des outils statistiques. Ce mémoire illustre également l'effet des paramètres sur l'effet de bord et optimise ces paramètres pour réduire ce phénomène dans une approche double fréquence séquentielle.

Ce mémoire présente des études numériques de la dureté par induction à double fréquence basées sur des simulations, car ces études ont prouvé que les approches à double fréquence séquentielle et simultanée sont meilleures, plus rapides, plus appropriées et économiques pour le durcissement des engrenages, pignons et autres composants mécaniques qui ont des formes géométriques complexes, dont le motif de contour du profil de dureté ne peut pas être obtenu par durcissement par induction en utilisant une fréquence unique. Ce mémoire ouvre la porte à l'industrie et à de nombreuses études futuristes basées sur l'utilisation de la double fréquence dans le processus de durcissement.

Mots clés : chauffage par induction, pignon, engrenages, séquentiel, simultané, double fréquence, FEM, acier 4340, effet de bord, ANOVA, contour, uniforme, concentrateur de flux.

ABSTRACT

Induction hardening is one of the applications of induction heat treatment that has wide implementations in the industry, such as quenching, normalizing, annealing. The most common applications of induction heat treatment are hardening, because of its environmental, quality, and economic advantages. In induction hardening, the heat treatment mainly depends on the electromagnetic phenomenon of a skin effect because this main feature has made induction hardening a widely applied method, especially in the field of heat treatment of automotive and aerospace components. Through the skin effect phenomenon, the temperature is generated inside the part to create the martensitic structure only to a given depth without contact with the heat source. The induction hardening process is based on the coupling of various complex physical phenomena (electromagnetic, thermal, and mechanical), which involve a large number of mechanical and geometric parameters affecting the final microstructure of the part. The mechanical characteristics of the part treated by the induction hardening process depend mainly on the pattern and depth of the hardness profile, which depends on the process parameters. One of the most important features of induction hardening is the possibility to automate the process. Simulations have proven their ability to fully describe the heating process and adjust the parameters of induction heating, which has led to the reduction of errors in testing methods in the industry to achieve the required hardening depth and pattern.

The objective of this thesis is to numerically model and simulate an AISI 4340 sprocket by a 3D heat-treated model. It is the sprocket or model that is treated by sequential and simultaneous dual-frequency induction using the finite element method (FEM) to solve the electromagnetic and heat transfer problems. Through this, this thesis aims to study the effect of using the sequential and simultaneous dual-frequency approach on the induction hardening process to explain the features and benefits that each approach adds to the process to achieve a uniform contour pattern of the hardness profile. This thesis includes three main sections based on a numerical simulation that was performed on COMSOL Multiphysics software. This thesis combines the study and exploration of the characteristics and advantages of each approach and the study of the sensitivity of the hardness profile and the final temperature distribution model by evaluating the effect of the parameters (heating time, imposed current density, and the axial gap of a flux concentrator over and below the sprocket) on the temperature profile and on the temperature variation between the edge and central regions and the temperature variation between the tip and the root using statistical tools. This thesis also illustrates the effect of parameters on the edge effect and optimizes these parameters to reduce this phenomenon in a sequential dual-frequency approach.

This thesis presents numerical studies of dual-frequency induction hardening based on simulations, as these studies have proven that sequential and simultaneous dual-frequency approaches are better, faster, more appropriate, and economical for hardening gears, sprockets, and other mechanical components that have complex geometric shapes, whose hardness profile contour pattern cannot be achieved by induction hardening using a single frequency. This thesis opens the door to industry and many futuristic studies based on the use of dual-frequency in the hardening process.

Keywords: induction heating, pinion, gears, sequential, simultaneous, dual frequency, FEM, 4340 steel, edge effect, ANOVA, contour, uniform, flux concentrator.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ.....	vii
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
0.1 MISE EN CONTEXTE	1
0.2 PROBLÉMATIQUE.....	8
0.3 OBJECTIFS	13
0.4 MÉTHODOLOGIE	14
0.5 ORGANISATION DU MÉMOIRE.....	16
0.6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	18
CHAPITRE 1: ÉTUDE DE L'EFFET DE L'UTILISATION D'UNE APPROCHE SÉQUENTIELLE À DOUBLE FRÉQUENCE DANS LE CHAUFFAGE PAR INDUCTION POUR LA TREMPE DU PROFIL D'UN PIGNON EN ACIER 4340 À L'AIDE D'UNE SIMULATION 3D ET D'UNE ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS	24
1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	24
1.2 Study the Effect of Using a Sequential Dual-Frequency Approach in Induction Heating for Hardening the Profile of 4340 Steel Sprocket Using 3D Simulation and Finite Element Analysis	26
1.2.1 Abstract.....	26
1.2.2 Introduction.....	27
1.2.3 Formula.....	31
1.2.4 Simulation Model	33
1.2.4.1 Geometry	33
1.2.4.2 Material	34
1.2.4.3 Meshing	34
1.2.4.4 Model Validity	35
1.2.5 Results and Discussion	35
1.2.5.1 Single Frequency Heating (MF and HF).....	35
1.2.5.2 Sequential Dual Frequency Heating.....	37
1.2.6 Conclusions.....	44
1.2.7 Références Bibliographiques	45

CHAPITRE 2: OBTENTION D'UN CONTOUR UNIFORME DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE AUTOUR DU PROFIL D'UN ÉCHANTILLON DE PIGNON DURCI PAR CHAUFFAGE PAR INDUCTION SÉQUENTIELLE LE À DOUBLE FRÉQUENCE	49
2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE	49
2.2 Obtaining a Uniform Contour Pattern of the Temperature Distribution Around the Profile of a Sprocket Sample Hardened by Sequential Dual-Frequency Induction Heating.	51
2.2.1 Abstract.....	51
2.2.2 Introduction.....	51
2.2.3 Theoretical Background.....	53
2.2.4 Simulation Model	55
2.2.4.1 Geometry	55
2.2.4.2 Material	56
2.2.4.3 Process Parameter Selection	56
2.2.4.4 Mesh Study	58
2.2.4.5 Experimental Design	60
2.2.5 Results and Discussion	60
2.2.5.1 Sensitivity Study of Temperature Profile.....	61
2.2.5.1.1 Contribution of Parameter on Temperature	61
2.2.5.1.2 Parameter Effect on Temperature	61
2.2.5.1.3 Predicted Temperature Model.....	63
2.2.5.2 Sensitivity Study of Temperature Difference.....	65
2.2.5.2.1 Contribution of Parameter on Temperature Difference	65
2.2.5.2.2 Parameter Effect on Temperature Difference	66
2.2.5.2.3 Predicted Temperature Difference Model.....	67
2.2.5.2.4 RSM of Temperature Difference Using ANOVA.....	69
2.2.5.3 Simulation Validation of Temperature Difference ANOVA Model.....	70
2.2.5.3.1 Numerical Optimization of Temperatures Difference	70
2.2.5.3.2 Final Simulation Validation	71
2.2.6 Conclusions.....	72
2.2.7 Références Bibliographiques	73

CHAPITRE 3: SIMULATION NUMÉRIQUE POUR L'UTILISATION DU CONCEPT SIMULTANÉ DE DOUBLE FRÉQUENCE DANS LE DURCISSEMENT PAR INDUCTION D'UN PIGNON EN ACIER 4340 - MODÈLE 3D	76
3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE	76
3.2 Numerical Simulation for Using the Simultaneous Dual-Frequency Concept in Induction Hardening of a 4340 Steel Sprocket -3D Model	77
3.2.1 Abstract.....	77
3.2.2 Introduction.....	77
3.2.3 Formulation.....	79
3.2.4 Simulation.....	80
3.2.4.1 Model's Geometry	81
3.2.4.2 Material	82
3.2.4.3 Process Parameter	82
3.2.4.4 Meshing	82
3.2.5 Results and Discussion	83
3.2.5.1 Influence of the SDF Concept on the Temperature Distribution	84
3.2.5.2 Influence of the SDF Concept on the Case Depth	87
3.2.6 Conclusions	89
3.2.7 Références Bibliographiques.....	90
CONCLUSION GÉNÉRALE	94

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1 : Simulation parameters when applying the sequential dual-frequency approach.....	38
Table 1.2 : Simulation depth results when applying the sequential dual-frequency approach. ...	44
Table 2.1 : Weight % of elements for alloy AISI 4340 steel.	56
Table 2.2 : Simulation Parameters of induction hardening Process.....	58
Table 2.3 : Input Parameters of induction hardening Process and their level.....	60
Table 2.4 : The ANOVA results for temperature profile model.	63
Table 2.5 : The ANOVA results for temperature difference model.....	66
Table 2.6 : The optimized results of temperature difference at optimal parameter conditions....	71
Table 2.7 : The optimization validation test results.	71
Table 3.1 : Weight % of elements for alloy AISI 4340 steel	82
Table 3.2 : Simulation parameters of induction hardening process	85
Table 3.3 : Simulation results.....	86
Table 3.4 : Simulation depth results when applying the SDF approach.	88

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Les modes de défaillance des dents les plus courants.	2
Figure 0.2 : Techniques dent par dent et gap par gap dans la trempe par induction. [38]	4
Figure 0.3 : Machine de trempe par induction. [42].....	5
Figure 0.4 : Le profil de dureté de l'engrenage résultant par induction de a) haute fréquence b) moyenne fréquence c) double fréquence. [14].....	6
Figure 0.5 : Simulation d'un profil d'engrenage austénitique chauffé par induction par MF, HF et double fréquence. [50].....	7
Figure 0.6 : Profil temps-température du durcissement par contour à double fréquence a) CDFP. b) CDFS. [52].....	7
Figure 0.7 : L'effet de l'ajout de concentrateurs de flux à la bobine d'induction dans le processus de trempe par induction. [72].....	12
Figure 0.8 : Courbe de dureté typique dans le processus de trempe par induction. [76]	13
Figure 1.1 : 3D FE model of induction heating with flux concentrator and final mesh.	34
Figure 1.2 : The part heating problem when reaching the austenitic temperature at the tip and the root using single MF.....	36
Figure 1.3 : Temperature (°C) distribution at the end of heating at MF case. a) Edge. b) Middle ...	36
Figure 1.4 : Temperature (°C) distribution at the end of heating at HF Case. a) Edge. b) Middle...	37
Figure 1.5 : Temperature (°C) distribution with heating time (s) when appl. a) MF. b) HF	37
Figure 1.6 : Minimum Temperature (°C) distribution at the end of heating when applying sequential dual-frequency approach at: a) Edge part. b) Middle part.	38
Figure 1.7 : Medium Temperature (°C) distribution at the end of heating when applying sequential dual-frequency approach at: a) Edge part. b) Middle part.	39
Figure 1.8 : Maximum Temperature (°C) distribution at the end of heating when applying sequential dual-frequency approach at: a) Edge part. b) Middle part.	39
Figure 1.9 : Minimum Temperature (°C) distribution with heating time (s) when applying sequential dual-frequency approach.....	40
Figure 1.10 : Medium Temperature (°C) distribution with heating time (s) when applying sequential dual-frequency approach.....	40
Figure 1.11 : Maximum Temperature (°C) distribution with heating time (s) when applying sequential dual-frequency approach.....	41
Figure 1.12 : Minimum Temperature (°C) distribution with depth (mm) when applying sequential dual-frequency approach at: a) Tip. b) Root.	42
Figure 1.13 : Medium Temperature (°C) distribution with depth (mm) when applying sequential dual-frequency approach at: a) Tip. b) Root.	42
Figure 1.14 : Maximum Temperature (°C) distribution with depth (mm) when applying sequential dual-frequency approach at: a) Tip. b) Root.....	43

Figure 1.15 : The expected hardness curve for the hardened profile of the sprocket at the edge of the tip in the case of the maximum temperature distribution.....	43
Figure 2.1 : The four ends of the main tooth head.	56
Figure 2.2 : The final design of the model with the final mesh.	56
Figure 2.3 : Study of flux concentrators gap (Axial gap).	57
Figure 2.4 : Temperature degree according to the mesh size.....	58
Figure 2.5 : Temperature evolution over time during HF and MF	59
Figure 2.6 : Temperature (°C) distribution at the end of heating. a Edge. b Middle	59
Figure 2.7 : Flowchart of the FEM study procedure	62
Figure 2.8 : Average Effect of parameters process on temperature.	64
Figure 2.9 : Simulated temperatures versus predicted temperature at middle and edges.	65
Figure 2.10 : Average Effect of parameters process on temperature difference.....	68
Figure 2.11 : Simulated versus predicted temperature difference	69
Figure 2.12 : RSM of temperature difference based on ANOVA analysis.....	70
Figure 3.1 : The four ends of the main tooth head	81
Figure 3.2 : The final design of the FE model with the final mesh size	81
Figure 3.3 : Temperature monitoring with mesh size.	83
Figure 3.4 : Flowchart of the FEM study procedure	85
Figure 3.5 : Temperature evolution with time during HF and MF simultaneously	86
Figure 3.6 : Temperature (°C) distribution at the end of heating. a Edge. b Middle	86
Figure 3.7 : Temperature (°C) distribution with depth (mm). a Tip. b Root	88
Figure 3.8 : Expected hardness curve for the hardened profile of the sprocket at the edge of the tip .	89

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 MISE EN CONTEXTE

De nos jours, le monde entier se dirige vers le développement, l'amélioration et l'économie d'efforts, de temps et de ressources dans tous les processus industriels, en particulier ceux qui sont utilisés dans un large éventail de domaines et d'applications. Les composantes mécaniques telles que les engrenages, les pignons et les cames sont parmi les plus importantes dans les machines que les chercheurs et les industriels cherchent à améliorer l'efficacité et la qualité en renforçant leurs propriétés mécaniques. Elles font partie de la configuration de base des machines, particulièrement dans les automobiles, les avions, les lignes de production industrielle et les machines agricoles [1-2]. Les dents des engrenages et des pignons à l'intérieur des machines sont soumises à différents modes de défaillance qui affectent leurs performances [3-4].

Parmi les principaux modes de défaillance des dents figurent l'usure, la fatigue par flexion et la fatigue par contact (piqûres), qui sont principalement dues à des causes liées à la résistance, à la force ou même à la lubrification. Afin de surmonter et de résoudre ces modes de défaillance des dents, il est important d'augmenter la dureté de la surface des dents et de générer des contraintes résiduelles de compression à la racine de la dent sur une profondeur suffisante. En plus, il est nécessaire de produire une couche de surface ayant une microstructure dure et à grain fin sur une profondeur suffisamment grande, en prenant soin de fournir les conditions de lubrification optimales et appropriées [5-9]. La **figure 0.1** présente des images des modes de défaillance des dents les plus courants qui se produisent pendant le fonctionnement. En général, la durée de vie des engrenages et des pignons (y compris les conditions de charge et l'environnement de fonctionnement) est liée à plusieurs facteurs, tels que la dureté de la surface, la dureté du cœur de la pièce, le profil de dureté, l'intégrité de la surface, la répartition des contraintes résiduelles, la qualité de l'acier ou encore la microstructure préalable de l'acier et aux conditions de lubrification [10-11].

Ainsi, parmi tous les matériaux à partir desquels les engrenages sont fabriqués, l'utilisation d'alliages d'acier a été préférée car plus de 90% des engrenages et des pignons utilisés dans les applications industrielles sont fabriqués en alliages d'acier en raison de leurs caractéristiques distinctes, notamment une haute trempabilité, des microstructures souhaitées dans la profondeur durcie et du noyau trempé qui sont nécessaires pour la haute résistance à la fatigue des engrenages et des pignons [12]. Les alliages d'acier utilisés dans la fabrication des engrenages et des pignons sont pour la plupart des alliages ferreux à faible teneur en carbone afin de pouvoir les traiter par la chaleur, et par conséquent, augmenter la résistance à la fatigue [13]. Pour éviter et prévenir les modes de défaillance des dents des engrenages et des pignons, et pour augmenter leur dureté, on applique un traitement thermique appelé durcissement de surface, qui confère aux pièces une surface dure qui résiste à l'usure, tout en conservant un intérieur plus ductile, qui offre une résistance à la rupture due aux impacts [14].

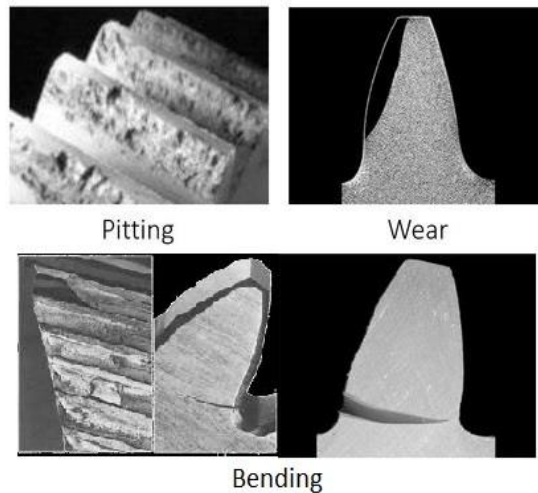


Figure 0.1 *Les modes de défaillance des dents les plus courants.*

Divers procédés de traitement thermique sont conçus pour durcir la surface d'une pièce. Ils comprennent généralement le chauffage et le refroidissement classés habituellement dans la catégorie de la trempe. Quatre des traitements de durcissement de surface les plus populaires sont la cémentation, la carbonitruration, la nitruration et la nitrocarburation ferritique. La cémentation est considérée comme l'une des méthodes les plus importantes et les plus utilisées pour la trempe de surface [15-17]. La trempe superficielle est appelée cémentation. Ce durcissement est généralement effectué par l'application d'une source d'énergie telle que la flamme, le laser ou le chauffage par induction [17].

L'induction électromagnétique est une méthode très importante et largement utilisée pour chauffer une pièce métallique. Elle peut être utilisée pour plusieurs types d'opérations de traitement thermique telles que la normalisation, le recuit, le chauffage de masse, la trempe, le revenu et le chauffage des métaux non ferreux. En outre, cette méthode de chauffage peut également être utilisée pour la fusion, le préchauffage pour le forgeage, le soudage et le brasage. Dans le domaine de la trempe, le chauffage par induction est une méthode de chauffage extrêmement polyvalente qui peut effectuer une cémentation uniforme, une trempe superficielle localisée, une trempe à cœur et un revenu des pièces trempées [18-20].

Les procédés de traitement thermique par induction dans la cémentation sont de plus en plus utilisés dans les industries de l'automobile et de l'aéronautique pour améliorer les performances opérationnelles du service telles que la durée de vie en fatigue, la résistance à l'usure et la déformation plastique de divers composants mécaniques [21]. Le principal avantage du chauffage par induction est que la source de chaleur est générée directement à l'intérieur du corps métallique à chauffer et dans les zones souhaitées. Il s'agit donc d'un processus sans contact pendant lequel le matériau chauffé n'est pas contaminé par le processus de chauffage, ce qui en fait une méthode efficace et respectueuse de l'environnement permettant d'avoir un meilleur contrôle sur le processus par rapport aux traitements chimiques ou autres qui utilisent des sources de chaleur externes [22-23].

L'application industrielle de la trempe par induction pour les engrenages est une technologie de traitement thermique intelligente, puissante et importante qui peut être appliquée à une large gamme d'engrenages et de pièces, particulièrement les engrenages droits internes et externes, hélicoïdaux, coniques et les pignons. Comme il s'agit d'une méthode de traitement thermique automatisable qui permet aux ingénieurs et aux fabricants d'automatiser le processus et de contrôler précisément la pièce trempée en termes de distribution de la température autour du profil, de profondeur de cémentation et de microstructure pour une dureté accrue, une résistance à l'usure, la capacité de fournir une structure martensitique à grain fin et d'autres propriétés [11, 22, 24].

En raison des nombreux avantages de la trempe à contour uniforme, elle constitue l'un des objectifs les plus importants de la trempe par induction des engrenages. Les avantages de la trempe à contour uniforme du profil de dureté sont de répartir uniformément les charges mécaniques, les contraintes résiduelles, de réduire la déformation, de limiter la propagation des fissures et de réduire l'impact des trous, des moyeux et des découpes qui, dans la conception de l'engrenage, permettent de réduire le poids, de remplir l'huile, de drainer, de monter un thermomètre à tous les niveaux, de retirer plus facilement le couvercle ou de lubrifier. Tout cela améliore la résistance à la fatigue des pièces et permet d'éviter les modes de défaillance des dents qui se produisent pendant leur fonctionnement [5, 7, 25-28]. La conception d'un modèle pour la trempe uniforme du profil de l'engrenage garantit qu'aucun point de la pièce n'atteint la température de fusion avant que les autres points n'atteignent la température d'austénitisation car les chercheurs et les industriels cherchent à éviter de fondre la pointe de la dent de l'engrenage avant que sa racine ne soit durcie [29].

La trempe par induction a commencé au début des années 1930 [19], et depuis cette époque jusqu'à aujourd'hui, elle est au centre de l'attention des ingénieurs, des chercheurs et même des mathématiciens car le processus de trempe par induction a connu de nombreux développements au cours des années qui en ont fait une méthode économique, robuste, de haute qualité et une approche sûre qui respecte l'environnement comparativement aux autres processus de trempe qui utilisent des fours ou des produits chimiques [30]. Le processus de trempe par induction des engrenages a fait l'objet de nombreux concepts, développements et méthodes visant à durcir les engrenages de manière efficace et rapide et à obtenir le modèle de trempe uniforme requis pour le profil durci, car comme les engrenages ou autres composants mécaniques qui ont des formes géométriques complexes, il est très difficile d'obtenir un profil uniforme le long des contours de la pièce en utilisant les méthodes de chauffage par induction conventionnelles [31-32].

De nombreuses techniques ont été développées pour concevoir la bobine d'induction afin d'obtenir un contour uniforme du profil de dureté pour les engrenages et autres composants mécaniques de formes géométriques complexes. Parmi ces techniques, la conception de la bobine d'induction en fonction de la dureté souhaitée et de la géométrie de la dent est connue sous le nom de technique dent par dent, et la conception de la bobine d'induction où elle encercle l'ensemble de l'engrenage (externe ou interne) qui est appelée durcissement par rotation [33-36]. L'approche dent par dent comprend deux techniques de durcissement : le durcissement « tête par tête » et le durcissement « écart par écart ».

Un inducteur encercle le corps d'une seule dent pendant le durcissement « tête par tête ». En revanche, le durcissement « écart par écart » nécessite que l'inducteur soit placé symétriquement entre deux côtés de dents voisines [35]. Les deux techniques (tête par tête et écart par écart) étaient des techniques longues, exigeantes en efforts et coûteuses liées aux nombreux modes de défaillance de la bobine de l'inducteur en raison de la température élevée du cuivre dont elle est constituée. De plus, elle ne concerne que les engrenages et les composants mécaniques de grande taille et non de petite taille, car elles sont inefficaces et inutiles pour les petits composants mécaniques [37]. La trempe « écart par écart » est une approche beaucoup plus courante par rapport à la méthode « tête par tête » [35]. La **figure 0.2** décrit les inducteurs « écart par écart », la trajectoire du courant de Foucault induit et la façon dont les grands engrenages sont durcis par cette technique.

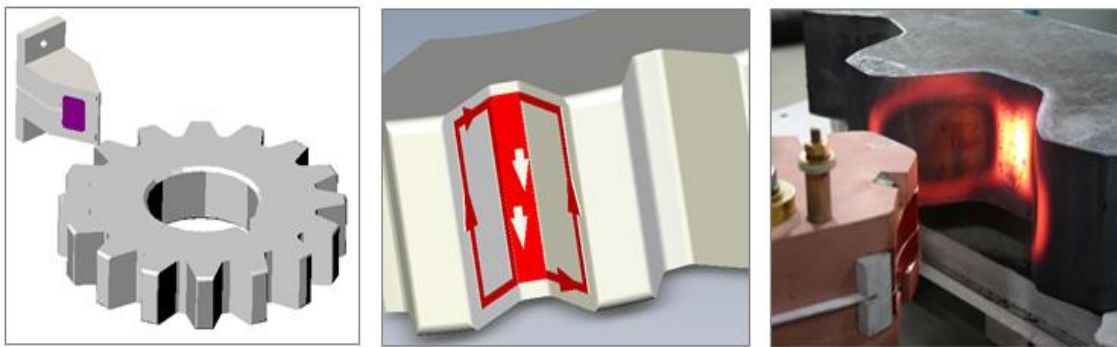


Figure 0.2 Techniques dent par dent et écart par écart dans la trempe par induction [38].

Quant à la trempe par rotation, c'est la meilleure technique, la plus efficace et la plus courante pour la trempe des engrenages de petite ou moyenne taille. De plus, elle est la plus adaptée en termes de coût, de temps, d'effort et de taux de production [22, 39, 40, 93]. L'engrenage trempé par rotation est chauffé par les inducteurs encerclés, puis trempé. La **figure 0.3** illustre la machine à induction par filage et le système de fonctionnement situé à l'École de Technologie Supérieure (Montréal, Canada). Comme on peut le constater, les engrenages sont mis en rotation par le moteur pendant le chauffage afin d'assurer une distribution uniforme de l'énergie. Différents paramètres d'inducteur sélectionnés tels que (puissance, fréquence et temps de chauffage) produiront différentes distributions de couches durcies.

Selon la façon dont le paramètre de fréquence est appliqué, il existe quatre concepts de chauffage populaires utilisés pour la trempe par induction des engrenages qui utilisent des bobines de type encerclant, à savoir la monofréquence conventionnelle (CCMF), la monofréquence pulsée (CPMF), la double fréquence pulsée (CDFP) et la double fréquence simultanée (CDFS). En fait, les concepts CCMF et CPMF sont des techniques traditionnelles dans lesquelles il est difficile d'obtenir un profil de dureté de contour uniforme pour les engrenages car elles utilisent une seule fréquence. Lorsque la haute fréquence est appliquée, par exemple, seule la pointe des dents de l'engrenage sera durcie, alors que le durcissement de la racine est associé à un chauffage à plus basse fréquence [22, 41].

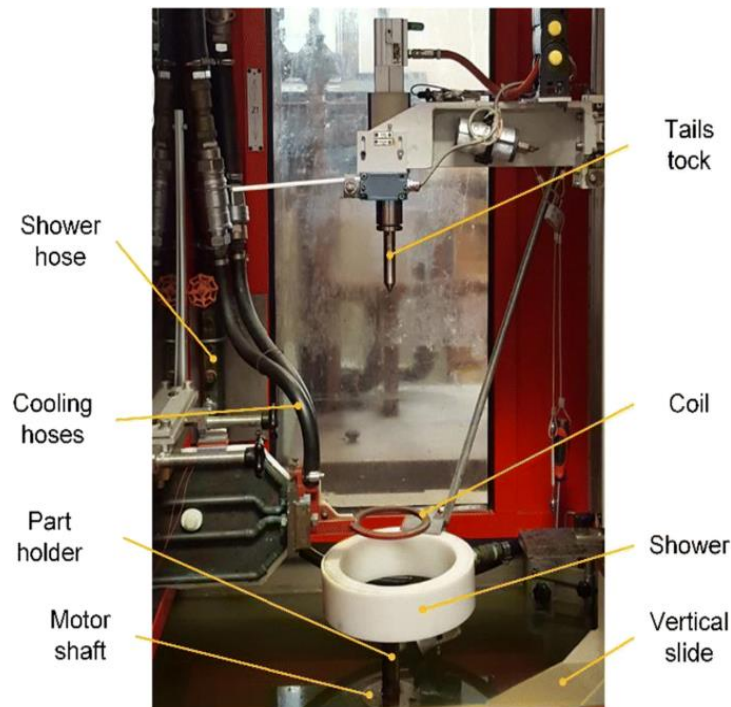


Figure 0.3 *Machine de trempe par induction.* [42]

Ainsi, pour obtenir un contour uniforme du profil de dureté des engrenages, l'idée d'utiliser la double fréquence a été développée au milieu des années 1950 en utilisant deux sources d'énergie distinctes à des fréquences différentes [43]. Pour comprendre l'effet général des moyennes et hautes fréquences sur la dureté des engrenages, la **figure 0.4** montre un exemple de dureté utilisant les doubles fréquences.

De plus, la **figure 0.4.a** montré un exemple de profil de dureté ayant recours uniquement au courant haute fréquence. La **figure 0.4.b** montre un exemple de motif de profil de dureté d'un engrenage utilisant uniquement un courant de moyenne fréquence. La **figure 0.4.c** montre un modèle de profil de dureté obtenu en combinant la moyenne et la haute fréquence [14, 44]. Le profil de dureté créé a pris un contour de la circonférence des dents de l'engrenage, tel ce que l'on cherche à obtenir dans la trempe par induction, car cela a un effet direct sur la résistance à l'usure et la durée de vie des engrenages, comme mentionné précédemment.

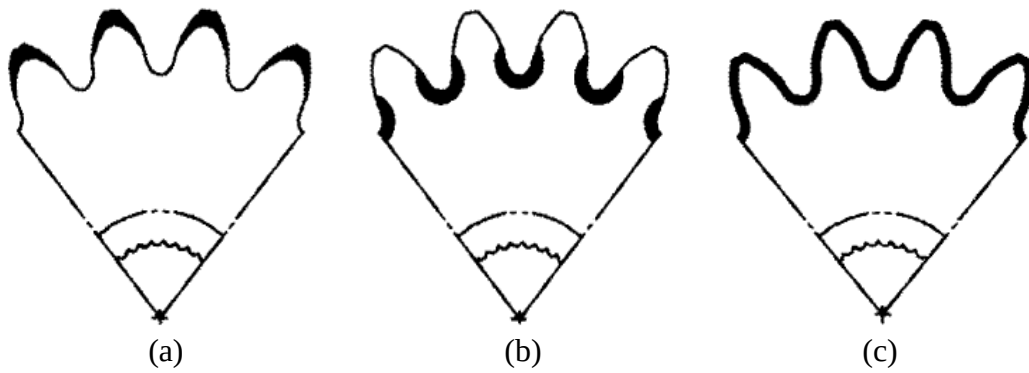


Figure 0.4 Le profil de dureté de l'engrenage résultant par induction de, a) haute fréquence b) moyenne fréquence c) double fréquence. [14]

Une description de la simulation de la fraction austénitique de l'engrenage peut être observée à la [figure 0.5](#) qui utilise à la fois haute et moyenne fréquence unique en comparaison à la double fréquence. L'idée d'utiliser la double fréquence pour obtenir un profil de dureté de contour uniforme de l'engrenage hélicoïdal et de l'engrenage droit a été lancée avec le concept de double fréquence pulsée (CDFP), en chauffant l'engrenage en deux étapes séquentielles, chacune avec une fréquence et une puissance appropriée. Le chauffage est généralement effectué par le CDFP en préchauffant la racine des dents de l'engrenage à une fréquence moyenne (MF), puis en passant à la source d'énergie haute fréquence (HF) pour le chauffage final afin de distribuer adéquatement la chaleur selon le contour des dents. Ensuite, les régions austénitisées sont transformées en martensite lors de la trempe [\[38, 45\]](#). Cependant, le CDFP souffre du problème de délai entre l'application des fréquences, ce qui a parfois conduit à l'échec de l'obtention du modèle de dureté uniforme requis pour certaines pièces mécaniques car il s'agit d'une méthode mécaniquement complexe qui prend du temps.

De nombreux chercheurs, ingénieurs et industriels ont essayé de réduire la différence de temps entre l'application des fréquences dans ce principe, mais malheureusement, même si la différence de temps était faible, elle avait un effet néfaste [\[38, 46\]](#). En raison des limitations et des défis rencontrés par la trempe par induction et pour la trempe du contour de l'engrenage et d'autres pièces de géométrie complexe par la trempe par induction CDFP, un nouveau concept a été développé dans l'utilisation de la double fréquence appelée double fréquence simultanée (CDFS) qui peut générer deux fréquences de manière simultanée [\[31\]](#). Dans ce concept, les fréquences MF et HF sont alimentées simultanément dans la bobine d'induction. Pour ce faire, on utilise deux onduleurs et on alimente une seule bobine d'induction avec des dispositifs de filtrage. Le durcissement des contours à double fréquence utilisant des fréquences simultanées est réalisé en chauffant la région de la racine au moyen de la MF, et celle de l'extrémité de la dent au moyen de la HF [\[47-49\]](#).

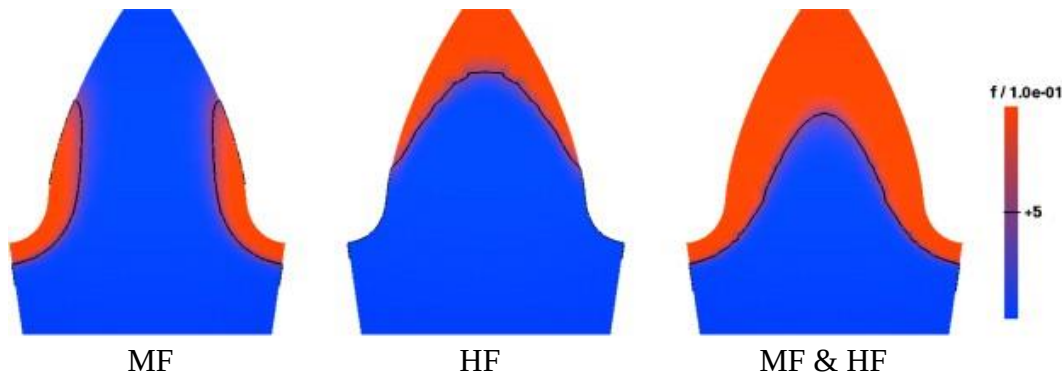


Figure 0.5 Simulation d'un profilé d'engrenage austénitique chauffé par induction par MF, HF et double fréquence. [50]

La **figure 0.6** montre un scénario de profil de temps et de température du durcissement des contours à double fréquence selon les principes CDFP et CDFS. Le traitement par induction CDFS est une combinaison intelligente de fréquences où la MF est utilisée pour fournir l'onde de fond à laquelle se superpose la HF. Dans le CDFS, un seul inducteur peut être utilisé et un seul générateur peut produire les deux fréquences simultanément. La caractéristique unique de ce concept dans le processus de durcissement par induction est que les amplitudes des deux fréquences peuvent être contrôlées indépendamment. La possibilité de contrôler les amplitudes de la moyenne ou de la haute fréquence permet d'adapter spécifiquement la densité d'énergie délivrée à la pièce, ce qui permet de mieux contrôler la distribution du courant alternatif pour « suivre » les contours de la pièce. Pour garantir le durcissement de la dent sur son contour réel sans durcissement à cœur et sans affecter le cœur de la pièce, des temps de chauffage courts, inférieurs à 0,5 seconde, sont nécessaires [14, 51].

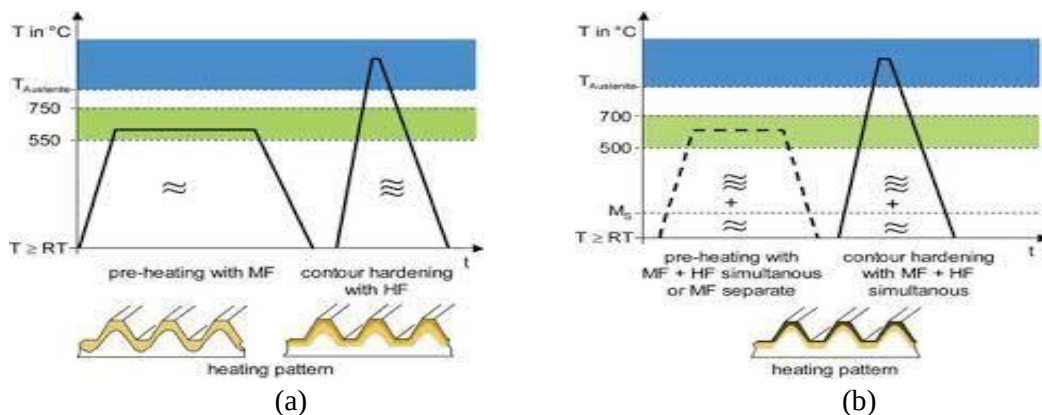


Figure 0.6 Profil temps-température du durcissement par contour à double fréquence a) CDFP. b) CDFS. [52]

Il convient de noter que les composants mécaniques couramment utilisés pour le traitement par induction sont généralement fabriqués en acier à teneur moyenne en carbone (0,35% à 0,60%). Le modèle de dureté final dépend également de la teneur en carbone de l'acier traité [53-54]. Au cours des dernières années, l'application de la technologie a eu un impact positif sur les industries, en particulier sur la trempe par induction, car elle est utilisée pour produire des pièces de haute qualité et robustes. De nos jours, les méthodes numériques de simulation deviennent de plus en plus importantes comme méthode d'analyse de référence afin d'optimiser les principaux paramètres du processus d'induction, en plus de la possibilité de coupler différents phénomènes physiques entre elles [22, 38].

0.2 PROBLÉMATIQUE

Comme il a été mentionné précédemment, la source de chaleur est générée directement à l'intérieur du corps métallique à chauffer. Cela est réalisé en utilisant une source d'électricité MF ou HF pour faire passer un courant alternatif dans une bobine d'induction. Le courant alternatif génère un champ électromagnétique très intense qui change rapidement dans l'espace de la bobine d'induction. Cela provoque un courant de Foucault induit dans la pièce conductrice par le champ électromagnétique alternatif et c'est ce qui fait apparaître le phénomène d'effet de peau électromagnétique. Grâce à ce phénomène électromagnétique, le courant électrique alternatif tend à se répartir dans la pièce de manière à ce que la densité de courant soit la plus importante près de la surface du conducteur et diminue avec la profondeur du conducteur. Dans le même temps, le phénomène d'effet de peau exprime la résistance du métal, ce qui entraîne un chauffage par joules. Par conséquent, le traitement thermique par induction implique une combinaison complexe de plusieurs phénomènes physiques tels que l'électromagnétisme, le transfert de chaleur et la métallurgie des métaux, des phénomènes non seulement électromagnétiques, mais aussi thermiques, qui sont étroitement liés entre eux. Les propriétés du matériau utilisées pendant le calcul dépendent de la température, par conséquent, les variables électromagnétiques et thermiques dépendent les unes des autres.

Le processus de solution numérique pose différents défis. Le problème comprend des équations non linéaires et couplées dans le domaine temporel qui présentent différentes échelles de temps. En outre, en raison de l'effet de peau, la densité des courants de Foucault se concentre dans une petite couche limite de la pièce, qui doit être résolue par discrétisation spatiale. Le schéma de trempe final du profil dans le processus de trempe par induction dépend principalement des paramètres du processus, qu'il s'agisse des paramètres de la machine (puissance d'entrée, fréquence du générateur, temps de chauffage, etc.) ou des paramètres du matériau et de la géométrie de la pièce, où chaque paramètre a son propre effet sur la distribution finale de la température et l'amplitude de la profondeur de cémentation. Ainsi, le processus de trempe par induction comprend de nombreux paramètres qui doivent toujours être étudiés, ajustés et dont leurs effets doivent être contrôlés afin de construire le meilleur profil de dureté possible dans les conditions optimales pour la trempe de la pièce. L'étude de ces différents paramètres et le processus de leur contrôle n'est pas une tâche facile, c'est plutôt une question très complexe.

Sans modélisation et sans études de simulation avant l'opération pour prédire la distribution finale de la température et le profil de dureté de la pièce, le processus de trempe par induction est complexe, coûteux et long sachant que par le passé les processus de trempe par induction dans l'industrie étaient basés sur des essais et des erreurs avec tous ces paramètres. Comme résultat, le processus de traitement thermique de trempe par induction était coûteux et exigeait beaucoup de travail et de temps pour l'obtention d'un profil de dureté requis qui peut répondre à des exigences opérationnelles spécifiques. Dans le cas du durcissement par induction à double fréquence, une attention particulière doit être accordée à l'ajustement des paramètres avant de fonctionner, car dans cette approche il y a deux alimentations et deux générateurs de fréquence. Obtenir les meilleures combinaisons des fréquences d'entrée et des puissances expérimentalement est très coûteux et prend beaucoup de temps, représentant un dilemme fondamental dans le domaine de l'industrie pour l'utilisation des approches de la dureté par induction à double fréquence. Par conséquent, de nombreuses études se sont concentrées sur l'identification de ces paramètres et le développement d'une approche à double fréquence dans le processus de trempe par induction en utilisant des techniques de simulation de modélisation numérique qui sont moins coûteuses et plus pratiques que les méthodes précédentes. Les chercheurs Diong et Corzine [55] ont réussi à proposer des convertisseurs multiniveaux pour fournir deux fréquences qui fonctionnent simultanément dans le processus de chauffage par induction. Ils ont présenté les résultats expérimentaux comme une vérification de l'analyse. Esteve et al. [32, 56] ont prouvé par la simulation et l'expérience que le convertisseur série à double fréquence est la solution idéale pour la trempe de pièces à géométrie complexe en termes de coût, de temps et d'amélioration de la qualité de la trempe. Selvi et al. [47] ont ensuite modifié le circuit résonnant de sortie décrit dans l'article d'Esteve [56] afin de mettre en évidence les aspects de contrôle et de conception de l'onduleur à double fréquence. Zgraja [48] s'est intéressé à la proposition et à la présentation des topologies des circuits à courant élevé des générateurs de chauffage par induction à double fréquence basés sur les systèmes de résonance de 4^e et 5^e ordre afin de réaliser une adaptation d'impédance simultanée pour MF et HF. Przulucki et Smalcerz [57] ont analysé un modèle d'engrenage 3D avec des impulsions à double fréquence, expliquant la complexité d'obtenir une distribution uniforme de la température autour du profil durci dans le processus de durcissement par induction conventionnel utilisant une seule fréquence. Barka et al. [44] ont réussi l'étude de sensibilité du profil de dureté d'un engrenage 4340- engrenage droit qui a été chauffé par induction par l'approche CDFP en utilisant une modélisation axisymétrique 2D. Rudnev [22] a expliqué que pour surmonter les difficultés et les défis rencontrés par la trempe dans les concepts conventionnels de trempe par induction, il est préférable d'utiliser des alimentations simultanées à double fréquence. Yang et al. [58] ont présenté une étude numérique basée sur la simulation d'un modèle d'engrenage de 22 dents chauffé par une approche synchrone à double fréquence utilisant la haute fréquence et la moyenne fréquence. Comme il a étudié la structure de l'alimentation à induction synchrone à double fréquence du pont à double inverseur pour optimiser les paramètres du capteur du pont à double inverseur et que le CDFS dans le processus de trempe par induction a des avantages clairs dans l'uniformité du chauffage autour de la circonférence du profil de l'engrenage, de ce fait elle représente la meilleure façon d'obtenir le modèle uniforme du profil de dureté de l'engrenage.

Yun et al. [59] ont réussi à décrire le développement de l'appareil de chauffage par induction DFS pour la trempe des engrenages par le biais de leur étude du modèle MEF 2D d'un engrenage qui est trempé par la trempe par induction CDFS. Ils ont prouvé par leur étude numérique et expérimentale que l'équipement développé est maintenant sur un réglage plus précis. Wrona et al [60] ont présenté l'étude numérique de la simulation du modèle 3D de la trempe par induction DFS pour les engrenages, en utilisant le logiciel commercial MEF (ANSYS). Hömberg et al [50] ont introduit et étudié un modèle 3D pour le durcissement par induction DFS de l'acier et l'ont résolu en utilisant les équations de Maxwell couplées à un bilan énergétique interne ainsi qu'à une équation différentielle ordinaire pour la fraction volumique de l'austénite.

Ces études ont convenu à l'unanimité que l'une des meilleures méthodes pour obtenir un modèle de profil de dureté uniforme pour les pièces à géométrie complexe qui seront durcies par chauffage par induction est d'utiliser l'approche à double fréquence dans la trempe par induction. Ces études ont expliqué la méthode de travail et la manière d'utiliser les concepts de double fréquence dans le processus de trempe par induction, mais également expliqué l'effet et les caractéristiques de l'utilisation de la double fréquence dans la trempe sur la distribution finale de la température. Cependant, à ce jour, il n'y a pas d'étude numérique 3D qui démontre l'effet des paramètres du processus sur le comportement de la dureté par induction à double fréquence, et les études précédentes étaient limitées à l'utilisation de la trempe par induction à double fréquence pour la dureté des engrenages uniquement sans considérer d'autres pièces mécaniques importantes telles que le pignon. Ces recherches ont révélé qu'il y a un manque d'étude de l'effet des paramètres sur la distribution finale de la température et la profondeur de cémentation.

Une revue de la littérature a démontré que les modèles 3D fournissent une plus grande précision de la distribution de la température à l'intérieur des pièces. Elle a également montré que la plupart des ingénieurs rencontrent des difficultés dans l'étude du chauffage par induction avec des modèles 3D en termes de conception du modèle et du temps passé sur le calcul qui rend difficile la réalisation d'un processus d'amélioration réelle [14, 23]. Les études MEF 3D nécessitent un temps de calcul important et des ressources extraordinaires pour traiter la question du couplage thermique-électromagnétique. Ainsi, la définition des paramètres d'entrée du CDFS est extrêmement essentielle sur la base de l'étude du modèle de travail pour identifier les paramètres d'entrée qui influencent réellement les résultats. Plusieurs études relatives à la dureté des pièces mécaniques ont expliqué l'importance d'étudier l'effet des paramètres, de les contrôler et de les ajuster pour obtenir le meilleur profil de dureté uniforme puisque ces études ont permis d'analyser le profil de dureté en fonction des propriétés du matériau ou en fonction des paramètres de la machine [61-65].

L'un des phénomènes électromagnétiques indésirables les plus importants dans le processus de chauffage par induction qui entraîne une perturbation de la distribution de la température sur le profil de la pièce est l'effet de bord, car il s'agit d'un phénomène électromagnétique décrivant les distributions du champ électromagnétique, du courant et de la puissance résultant d'un changement soudain de la géométrie ou des propriétés du matériau dans la trajectoire du courants de Foucault [66] où l'on constate que le champ magnétique dans la trempe des engrenages est concentré sur les bords. Cela entraîne le chauffage du bord de la pièce à une température plus élevée que celle du milieu de la pièce [67]. Plusieurs chercheurs ont essayé de réduire cet effet en raison de ses effets négatifs sur le profil de dureté [29, 42, 68-69]. Afin de réduire l'effet de bord électromagnétique et de le contrôler, des concentrateurs de flux ont été développés. Il s'agit de matériaux magnétiques qui fournissent un meilleur chemin spécifiquement pour les lignes de champs électromagnétiques, ce qui permet de concentrer les champs magnétiques sur les zones souhaitées de la pièce et d'empêcher leur flux dans d'autres zones indésirables [70-72]. Ainsi, les concentrateurs de flux réduisent la consommation d'énergie, le temps de chauffage, la distorsion et l'effet de bord permettant d'obtenir un profil de dureté uniforme [73-74].

La **figure 0.7** montre comment, en ajoutant des concentrateurs de flux à la bobine d'induction, les lignes de champ électromagnétique sont disposées, regroupées, mieux dirigées et focalisées vers la zone à durcir. Une étude documentaire a indiqué que les concentrateurs de flux sont constitués de deux types de base, à savoir des paquets de poinçons en acier au silicium laminé pour les fréquences moyennes ou basses, et des combinaisons de ferrites ou de fer en poudre pour les fréquences plus élevées. Ces concentrateurs de flux doivent être placés directement dans ou sur la bobine de l'inducteur [38]. Toutefois cette méthode présente plusieurs inconvénients, dont le plus important est qu'il s'agit d'un procédé quelque peu coûteux en termes de conception et de maintenance, et que l'efficacité des concentrateurs de flux dans leur capacité à focaliser les champs électromagnétiques se détériore lentement avec le temps du fait de l'intensité du champ électromagnétique et de la chaleur pendant le fonctionnement. En effet, les concentrateurs de flux peuvent fondre en raison des courants élevés dans le processus si des conditions de refroidissement suffisantes et appropriées ne sont pas disponibles pour eux [14, 73].

Barka et al [75] ont développé et innové une nouvelle approche des concentrateurs de flux consistant en deux parties qui ont la même forme et géométrie pour la pièce à durcir de sorte que la pièce à durcir soit placée au milieu de ces deux concentrateurs à une certaine distance qui assure que l'effet de bord est grandement réduit. Cette approche a été appliquée à un engrenage droit en acier et a montré des résultats remarquables dans la régulation, la redistribution et la direction des lignes de champ électromagnétique autour de la périphérie de la pièce principale à durcir. Cette technique peut augmenter l'efficacité du processus de traitement par induction et obtenir des profils de température plus cohérents entre le bord et le milieu de la pièce. Cette approche est économiquement et pratiquement bénéfique car elle permet une production rapide et permet de réduire le fardeau du coût de la maintenance et de la conception des concentrateurs de flux placés dans ou sur la bobine qui doivent s'adapter à la mesure de chaque application.

Dans le processus de trempe par induction, la couche de surface à durcir est chauffée à la température à laquelle l'austénitisation a lieu. En raison du transfert de chaleur et de l'effet de concentration, les zones sous cette couche à durcir sont chauffées, mais à des températures plus basses [38]. Ce chauffage conduit à l'émergence d'une région de surtrome que les chercheurs et les ingénieurs cherchent à réduire autant que possible [76, 77].

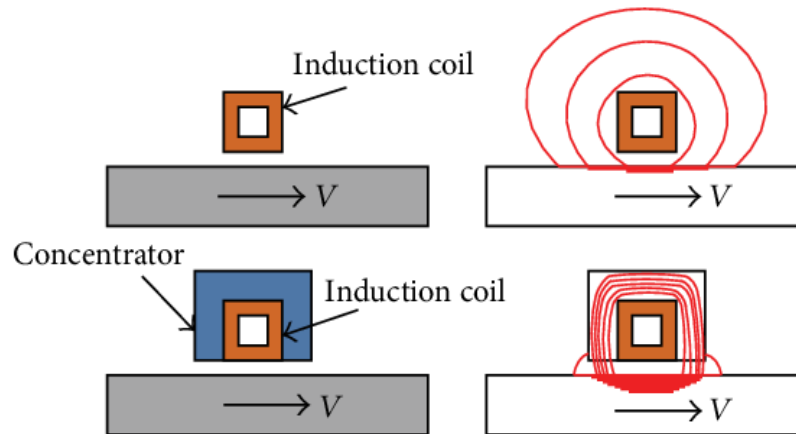


Figure 0.7 L'effet de l'ajout de concentrateurs de flux à la bobine d'induction dans le processus de trempe par induction. [72]

La **figure 0.8** présente la courbe de dureté typique pour la trempe par induction dans laquelle est illustrée la région de surchauffe affectée par le processus de traitement thermique.

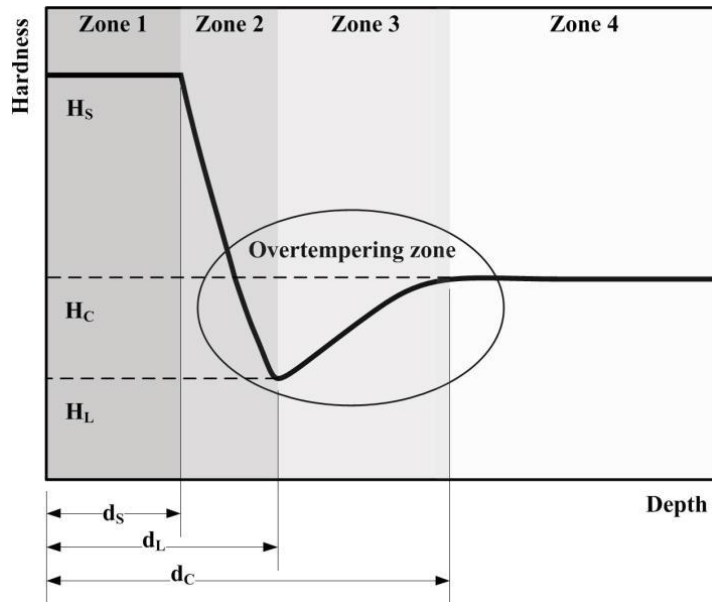


Figure 0.8 Courbe de dureté typique dans le processus de trempe par induction. [76]

Par conséquent, le problème de cette mémoire est de trouver une solution pour réaliser le contour unifié du profil de dureté pour les pièces mécaniques avec des formes géométriques complexes qui ont été trempées par induction, ainsi que pour réduire l'effet de bord électromagnétique en utilisant l'approche à double fréquence dans la trempe par induction, et de démontrer l'efficacité, la qualité et les gains de temps de cette approche pour réaliser le contour du profil de dureté.

0.3 OBJECTIFS

Ce mémoire a pour but de mener une étude numérique examinant la simulation de l'application du concept de double fréquence séquentielle et simultanée dans la trempe par induction d'un pignon AISI 4340 en utilisant une approche de concentrateurs de flux de la forme et de la géométrie identiques de la pièce à tremper et de démontrer l'effet de ces concepts sur la distribution finale de la température autour du profil de dureté, sur la profondeur de cémentation et sur la région de surchauffe. L'approche est basée sur une analyse couplée des champs électromagnétiques et thermiques prenant en compte les propriétés des matériaux et les paramètres du processus en utilisant un logiciel méthode d'éléments finis (MEF).

- Le premier objectif de ce mémoire était de concevoir un modèle MEF 3D efficace pour le traitement thermique d'un pignon en utilisant la trempe par induction séquentielle à double fréquence, de révéler les caractéristiques et les avantages de cette approche en plus de la flexibilité dans le contrôle de la distribution de la température autour du profil de la pièce, ainsi que de clarifier l'importance de cette approche dans la réalisation du profil de dureté

du contour de la dent. Ce modèle MEF a également été utilisé pour démontrer l'impossibilité d'obtenir le profil de dureté de contour souhaité pour ce composant mécanique (pignon) en utilisant la trempe par induction à fréquence unique.

- En utilisant le même modèle MEF 3D de la première section, le deuxième objectif de ce mémoire visait à employer des outils statistiques pour mener une étude de sensibilité du profil de dureté à la distribution de température finale en étudiant le degré d'importance et d'influence des paramètres de durcissement par induction sur la distribution de température autour du profil de dureté et sur la différence de température entre la racine et la pointe de la dent de pignon, en plus de mieux comprendre l'environnement multi-physique de la simulation et de l'ensemble du processus. Les interactions et les corrélations entre ces paramètres ont été étudiées afin de générer des modèles robustes, efficaces et fiables pour prédire la température et la différence de température.
- Ensuite, le modèle a été modifié pour travailler sur le chauffage par induction à double fréquence simultanée. Le troisième objectif de ce mémoire vise à fournir et présenter un modèle MEF 3D du pignon qui est traité thermiquement par le durcissement simultané par induction à double fréquence (CDFS), cherchant à expliquer et à clarifier les caractéristiques et l'effet du CDFS dans la réalisation du modèle de contour du profil de dureté, plus une déclaration sur l'efficacité et la rapidité de ce concept dans la réalisation de ce modèle de contour.

Ce mémoire, en général, présente trois études concernées et intéressées par l'application de deux concepts de double fréquence dans la trempe par induction, où elle ouvre une large porte à l'intérêt de l'application de la double fréquence dans le monde du chauffage par induction, où elle représente une solution radicale dans l'obtention du profil de dureté uniforme pour les formes géométriques complexes.

0.4 MÉTHODOLOGIE

Dans ces études, une méthodologie a été suivie à travers laquelle les objectifs recherchés par ce mémoire ont été atteints. Cette méthodologie est basée sur une étude numérique d'un modèle MEF 3D capable d'appliquer une double fréquence, séquentielle ou simultanée, dans le processus de durcissement par induction d'un pignon en AISI 4340. La méthodologie des trois études de ce mémoire a commencé par la conception d'un modèle 3D sur le logiciel COMSOL Multiphysics d'une bobine d'induction encerclant le pignon et placée entre deux autres pignons de formes identiques agissant comme des concentrateurs de flux. Cette conception est placée dans un environnement d'air isolé.

Ensuite, la forme rotative et la symétrie planaire du pignon et de la bobine ont été utilisées pour réduire de moitié les deux concentrateurs de flux et la bobine et les dents principales ont été réduites à un quadrant, ce qui a permis de prendre en compte la moitié d'un des concentrateurs de flux. Cette approche a permis d'alléger une grande partie du temps de calcul et d'améliorer

l'efficacité des résultats. Le matériau à partir duquel le pignon serait formé a été l'acier AISI 4340 sur la base de la teneur en carbone de ce matériau homogène et des propriétés qui permettent une bonne trempe de la pièce, car sa composition chimique indiquait qu'il s'agissait d'un matériau présentant des caractéristiques élevées de ténacité, de bonne déformabilité et de bonne trempabilité [81]. En plus, cet acier est largement utilisé dans les industries automobile et aérospatiale.

Sur la base de la simulation numérique du modèle, les paramètres influençant le plus le processus ont été sélectionnés et certifiés comme étant les paramètres qui seront étudiés et contrôlés dans ce mémoire. Ensuite, des valeurs de paramètres aléatoires ont été sélectionnées pour mener des études de convergence pour la taille de la maille du modèle. Ces études offrent un temps fin dans le calcul et en même temps la précision et la qualité dans les résultats. La première étude de ce mémoire utilisant la simulation du modèle MEF a suivi une stratégie dans laquelle nous avons expliqué, tout d'abord, que lors de l'application du chauffage par induction à fréquence unique dans le processus de durcissement, il est très difficile d'obtenir un modèle uniforme pour le profil de dureté et même impossible dans certaines pièces mécaniques aux formes géométriques complexes. Ensuite, nous avons modifié et ajusté les paramètres de durcissement par induction à fréquence unique dans le HF et le MF pour atteindre une température de référence qui nous permet de connaître les paramètres auxquels la racine de la dent est durcie lors de l'application du MF et le durcissement de la pointe de la dent lors de l'application du HF. Puis, le modèle a été développé pour travailler sur le chauffage par induction séquentiel à double fréquence. De nombreuses simulations ont été effectuées en cherchant à ajuster les paramètres du processus pour obtenir une distribution de la température autour du profil de la pièce en trois niveaux (maximum, moyen et minimum). En partant de cela, on explique la mesure dans laquelle le contrôle de la distribution de la température autour du profil de la pièce en utilisant la double fréquence séquentielle. Ensuite, à chaque niveau de la distribution de la température, les profondeurs de durcissement ont été extraites sur la base de la température le long de chaque côté de la pièce suivies par l'étude de la profondeur du cas et de la région de surchauffe pour chaque niveau.

En prenant le modèle MEF développé pour travailler sur la trempe par induction séquentielle à double fréquence de la première étude, la méthodologie de la deuxième étude de ce mémoire est d'abord de mener une étude visant à trouver les meilleurs paramètres et niveaux de paramètres pour obtenir la plus faible différence de température entre les extrémités de la pointe et la racine de la dent du pignon, puis d'appliquer la méthode intelligente de Taguchi à ces niveaux pour la conception des expériences. Le plan d'expériences sera simulé avec le logiciel COMSOL Multiphysics associé à un code MATLAB via l'interface LiveLink pour traiter le grand nombre de simulations 3D qui prennent beaucoup de temps de calcul. Ensuite, les résultats sont exportés du programme MATLAB vers le programme Minitab qui permet de faire une analyse statistique des résultats de la simulation. Une étude statistique d'analyse de variance (ANOVA) a été menée sur les résultats de température et sur la différence de température, dans le but d'étudier l'influence et la contribution de chaque paramètre du processus sur la température finale et sur l'effet de bord en étudiant l'influence de ces paramètres ainsi que sa contribution sur la différence de température entre la pointe et la racine de la dent du pignon. Ensuite, l'ANOVA a été utilisée pour créer des modèles mathématiques permettant de prédire la température finale et la différence de température. L'adéquation de ces modèles et leur prédictibilité ont été testées à l'aide de diverses mesures d'adéquation. Ensuite, les graphiques de la méthode de surface de réponse (RSM) des paramètres

influençant le plus la différence de température ont été tracés sur la base des résultats précédents de l'ANOVA. À la fin de l'étude, les modèles ANOVA proposés ont été validés en simulant les paramètres optimaux obtenus par le processus d'optimisation par ANOVA pour obtenir la plus faible différence de température entre les extrémités de la pointe et la racine de la dent.

Quant à la méthodologie de la troisième étude de ce mémoire, elle est représentée par la modification et le développement du modèle MEF qui a été travaillé dans les deux études précédentes, pour pouvoir appliquer la trempe par induction simultanée à double fréquence dans le traitement thermique des dents de pignon. Ensuite, nous avons ajusté les paramètres du processus afin d'obtenir un modèle uniforme pour le profil de dureté à la température la plus basse possible qui transforme la structure du matériau en austénite. La température a été surveillée à chaque extrémité de la pointe et à la racine de la dent pour évaluer son évolution dans le temps et sa répartition uniforme autour du profil de dureté pour illustrer l'effet d'une approche simultanée à double fréquence sur l'effet de bord. À la fin de cette étude, la valeur de la profondeur durcie de durcissement est contrôlée par les résultats de température obtenus afin de clarifier l'effet de l'utilisation de l'approche DFS sur la profondeur durcie.

0.5 ORGANISATION DU MÉMOIRE

En plus de cette introduction générale, ce mémoire est divisé en trois chapitres rédigés sous forme d'articles, et il est terminé par une conclusion générale.

L'introduction générale présente le traitement thermique en général et le traitement thermique par induction en particulier et se concentre sur l'explication des concepts de la trempe par induction.

Le premier chapitre présente, un moyen de la modélisation et de la simulation numérique, une explication et une analyse de l'effet de l'utilisation d'une approche séquentielle à double fréquence dans le chauffage par induction pour la trempe du profil d'un pignon AISI 4340 placé entre deux concentrateurs de flux. La différence entre l'application à double fréquence et l'application à fréquence unique dans la trempe par induction est aussi expliquée.

Le deuxième chapitre montre une analyse de différents paramètres mécaniques et thermiques explique aussi une étude de leurs interactions sur la distribution de la température et la profondeur de trempe, pour le même modèle de pignon utilisé dans le premier chapitre traité par induction séquentielle à double fréquence, dans le but d'obtenir un contour uniforme de la distribution de la température autour du profil d'un échantillon de pignon trempé par induction séquentielle à double fréquence. Des modèles mathématiques ont été établis pour prédire la température et la différence de température en utilisant la méthode d'analyse de la variance, et les paramètres du processus ont été optimisés par la méthode d'analyse de la variance basée sur la réduction de l'effet de bord.

Le troisième chapitre présente une simulation numérique pour l'utilisation du concept à double fréquence simultanée dans la trempe par induction d'un pignon en acier 4340 également placé entre deux concentrateurs de flux. Ce chapitre est consacré à l'étude de l'effet de l'utilisation de la trempe par induction avec le concept DFS sur des pièces mécaniques aux formes géométriques complexes

et à la clarification des caractéristiques de ce concept dans la réalisation du contour unifié du profil de la dureté pour les pièces trempées par induction.

Enfin, une conclusion générale met brièvement en lumière les objectifs de ce mémoire et les résultats obtenus dans le cadre de ce projet et confirme les liens entre eux. Cette conclusion générale illustre l'importance de ce mémoire pour les futurs travaux de recherche.

0.6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Collins, J. A., Busby, H. R., & Staab, G. H. (2009). *Mechanical design of machine elements and machines: a failure prevention perspective*. John Wiley & Sons.
- [2] Radzevich, S. (2012). *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press LLC.
- [3] Ku, P. M. (1976). *Gear Failure Modes—Importance of Lubrication and Mechanics*. *ASLE Transactions*, 19(3), 239–249. doi:10.1080/05698197608982799.
- [4] Radzevich, S. P., & Dudley, D. W. (1994). *Handbook of practical gear design*. CRC press.
- [5] Grum, J. (2001). *A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding*. *Journal of Materials Processing Technology*, 114(3), 212–226. doi:10.1016/s0924-0136(01)00562-3.
- [6] Kanehira, M. and Otoshi, K., 1997. *The Complete Guide To Chain*. Wheeling, IL: US Tsubaki.
- [7] Jelaska, D. T. (2012). *Gears and gear drives*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- [8] Thipprakmas, S. (2011). *Improving wear resistance of sprocket parts using a fine-blanking process*. *Wear*, 271(9-10), 2396–2401. doi:10.1016/j.wear.2010.12.015.
- [9] Errichello, R., & Muller, J. (2002). *How to analyze gear failures*. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2(6), 8-16.
- [10] Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2012). *Fundamentals of Machine Component Design* (5th ed.). J. Wiley & Sons.
- [11] Denkena, B., Poll, G., Maiß, O., & Neubauer, T. (2014). *Affecting the Life Time of Roller Bearings by an Optimal Surface Integrity Design after Hard Turning and Deep Rolling*. *Advanced Materials Research*, 966-967, 425–434. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.966-967.425.
- [12] Rakhit, A. K. (2000). *Heat treatment of gears: a practical guide for engineers*. ASM international.
- [13] Otto, F. J., & Herring, D. H. (2002). *Gear heat treatment*. *Heat Treating Progress(USA)*, 2(4), 55-59.
- [14] Haimbaugh, R. E. (2015). *Practical Induction Heat Treating*. 2nd ed. Materials Park, Ohio: ASM International.
- [15] Rowan, O. K., & Sisson, R. D. (2009). *Effect of Alloy Composition on Carburizing Performance of Steel*. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 30(3), 235–241. doi:10.1007/s11669-009-9500-7
- [16] Davis, J. R. (Ed.). (2002). *Surface hardening of steels: understanding the basics*. ASM international.
- [17] Dossett, J., & Totten, G. E. (2013). *Introduction to surface hardening of steels*. *ASM Handbook*, 4, 389-398.

- [18] Rudnev, V. (2005). Metallurgical ‘fine points’ of induction hardening. *Inductoheat Group, Madison Heights, Mich, Heat treating*.
- [19] Gur, C., & Pan, J. (2009). *Handbook Of Thermal Process Modeling Of Steels*. Boca Raton,: CRC Press.
- [20] Bay, F., Labbe, V., Favennec, Y., & Chenot, J. L. (2003). *A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics. International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 58(6), 839–867. doi:10.1002/nme.796.
- [21] Larregain, B., Vanderesse, N., Bridier, F., Bocher, P., & Arkinson, P. (2013). *Method for Accurate Surface Temperature Measurements During Fast Induction Heating. Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(7), 1907–1913. doi:10.1007/s11665-013-0527-x.
- [22] Rudnev, V. (2008). Induction hardening of gears and critical components, Part 2. *Gear Technology*, 47-53.
- [23] Rapoport, E. and Pleshivtseva, Y., 2007. *Optimal Control Of Induction Heating Processes*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis.
- [24] Zinn, S. and Semiatin, S., 1988. *Elements Of Induction Heating: Design, Control, And Applications*. Metals Park, OH: ASM.
- [25] Grum, J., 2003. Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction surface hardening and finish grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(3), pp.173-182.
- [26] Watson, H. J. (1970). *Modern Gear Production*.1st ed. Burlington: Elsevier Science.
- [27] Fakir, R., Barka, N., Brousseau, J., & Caron-Guillemette, G. (2020). *Analysis of the Mechanical Behavior of AISI 4340 Steel Cylindrical Specimens Heat Treated with Fiber Laser. Journal of Manufacturing Processes*, 55, 41–56. doi:10.1016/j.jmapro.2020.03.039.
- [28] Barka, N., Sattarpanah Karganroudi, S., Fakir, R., Thibeault, P., & Feujofack Kemda, V. B. (2020). *Effects of Laser Hardening Process Parameters on Hardness Profile of 4340 Steel Spline—An Experimental Approach. Coatings*, 10(4), 342. doi:10.3390/coatings10040342.
- [29] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2019). *Reduction of edge effect using response surface methodology and artificial neural network modeling of a spur gear treated by induction with flux concentrators. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-019-03817-9.
- [30] KOHLI, A., & SINGH, H. (2011). *Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology. Sadhana*, 36(2), 141–152. doi:10.1007/s12046-011-0020-x.
- [31] Schwenk, W. R. (2003). Simultaneous Dual-Frequency Induction Hardening. *Heat Treating Progress*, 3(3), 35-38.
- [32] Esteve, V., Jordan, J., Dede, E. J., Sanchis-Kilders, E., & Maset, E. (2006, March). Induction heating inverter with simultaneous dual-frequency output. In *Twenty-*

- First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06.* (pp. 5-pp). IEEE.
- [33] Midea, S. J., & Lynch, P. (2014). Tooth-by-tooth induction hardening of gears (and how to avoid some common problems). *Proc. Thermal Process. Gear Solutions*, 46-51.
 - [34] Wen, H., & Han, Y. (2017). *Study on mobile induction heating process of internal gear rings for wind power generation. Applied Thermal Engineering*, 112, 507–515. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.113.
 - [35] Rudnev, V. (2012). Recent inventions and innovations in induction hardening of gears and gear-like components. *American Gear Manufacturers Association*.
 - [36] Barglik, J., Smalcerz, A., Przylucki, R., & Doležel, I. (2014). 3D modeling of induction hardening of gear wheels. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 270, 231-240.
 - [37] Rudnev, V. (2008). Induction hardening of gears and critical components, Part 1. *Gear Technology*, 58-63.
 - [38] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). *Handbook of Induction Heating* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
 - [39] Barglik, J., Smalcerz, A., & Smagor, A. (2015, October). Induction hardening of small gear wheels made of steel 50CrMo4. In *8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*.
 - [40] Rudnev, V. (2004). Spin Hardening of Gears Revisited. *Heat Treating Progress*, 17-20.
 - [41] Rudnev, V., & Totten, G. E. (2014). ASM Handbook Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment. *ASM International, Ohio*.
 - [42] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2018). *Correction to: Sensitivity study of hardness profile of 4340 steel disc hardened by induction according to machine parameters and geometrical factors. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-018-3050-2.
 - [43] Barka, N. (2017). *Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction—2D model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4), 1173–1181. doi:10.1007/s00170-017-0586-5.
 - [44] Barka, N., Chebak, A., & El Ouafi, A. (2013). *Simulation of Helical Gear Heated by Induction Process Using 3D Model. Advanced Materials Research*, 658, 266–270. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.658.266.
 - [45] Barglik, J., Ducki, K., Kukla, D., Mizera, J., Mrówka-Nowotnik, G., Sieniawski, J., & Smalcerz, A. (2018). *Comparison of single and consecutive dual frequency induction surface hardening of gear wheels. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 355, 012015. doi:10.1088/1757-899x/355/1/012015.
 - [46] Tong, D., Gu, J., & Totten, G. E. (2018). *Numerical investigation of asynchronous dual-frequency induction hardening of spur gear. International Journal of Mechanical Sciences*, 142-143, 1–9. doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.04.036.

- [47] Selvi, S. P., Kumar, P. S., & Vishwanathan, N. (2014, December). Design and control of two-inverter dual frequency induction hardening. In *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [48] Zgraja, J. (2018). Impedance matching in dual-frequency induction heating systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 94(4), 55-58. doi:10.15199/48.2018.04.14.
- [49] Hömberg, D., Liu, Q., Montalvo-Urquizo, J., Nadolski, D., Petzold, T., Schmidt, A., & Schulz, A. (2016). Simulation of multi-frequency-induction-hardening including phase transitions and mechanical effects. *Finite Elements in Analysis and Design*, 121, 86-100.
- [50] Hömberg, D., Petzold, T., & Rocca, E. (2015). Analysis and simulations of multifrequency induction hardening. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 22, 84-97.
- [51] Schwenk, W. (2003). The simultaneous dual frequency method of inductive gear hardening. *Gear Solutions*, May.
- [52] Marquis, F., & Stiele, H. (2007). Induction Hardening of Gears Offers Various Approaches. *HEAT TREATING PROGRESS*, 7(4), 22.
- [53] Woodard, P. R., Chandrasekar, S., & Yang, H. T. Y. (1999). *Analysis of temperature and microstructure in the quenching of steel cylinders. Metallurgical and Materials Transactions B*, 30(4), 815–822. doi:10.1007/s11663-999-0043-4.
- [54] Wang, K. F., Chandrasekar, S., & Yang, H. T. Y. (1997). *Experimental and Computational Study of the Quenching of Carbon Steel. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(3), 257. doi:10.1115/1.2831102.
- [55] Diong, B., Basireddy, S., & Corzine, K. (2003, November). Multilevel converter-based dual-frequency induction heating power supply. In *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No. 03CH37468)* (Vol. 2, pp. 1992-1997). IEEE.
- [56] Esteve, V., Pardo, J., Jordan, J., Dede, E. J., Sanchis-Kilders, E., & Maset, E. (2005, June). High power resonant inverter with simultaneous dual-frequency output. In *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference* (pp. 1278-1281). IEEE.
- [57] Przyłucki, R., & Smalcerz, A. (2013). Induction heating of gears-pulsing dual-frequency concept. *Metalurgija*, 52(2), 235-238.
- [58] Yang, L., Yaceng, S., Hao, L., & Yichao, S. (2019, November). Designing and Optimization of Gear Synchronous Dual-Frequency Induction Heating Power Supply Based on ANSYS. In *2019 International Conference on Precision Machining, Non-Traditional Machining and Intelligent Manufacturing (PNTIM 2019)* (pp. 214-219). Atlantis Press.
- [59] Yun, D., Park, H., Koo, J. H., Ham, S., & Lee, S. (2015). Investigation of heat treatment of gears using a simultaneous dual frequency induction heating method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4.
- [60] Wrona, E., Nacke, B., & Resetov, D. (2003, March). 3D-modelling of the transient heating process for induction surface hardening. In *MEP-International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing, Hanover* (pp. 119-123).

- [61] Hammi, H., El Ouafi, A., & Barka, N. (2016). Study of frequency effects on hardness profile of spline shaft heat-treated by induction. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(03), 1.
- [62] Barka, N., Ouafi, A. E., Bocher, P., & Brousseau, J. (2013). Effects of Material Properties for Non-Equilibrium Conditions in Induction Heating Process. In *Advanced Materials Research* (Vol. 664, pp. 496-503). Trans Tech Publications Ltd.
- [63] Barka, N., Chebak, A., & Brousseau, J. (2011, March). Study of edge effect of 4340 steel specimen heated by induction process using Axi-symmetric simulation. In *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Marrakesh, Morocco*.
- [64] Barka, N., Chebak, A., Ouafi, A. E., Bocher, P., & Brousseau, J. (2012). Sensitivity study of temperature profile of 4340 spur gear heated by induction process using 3D model. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 232, pp. 736-741). Trans Tech Publications Ltd.
- [65] Hammi, H., Barka, N., & El Ouafi, A. (2015). Effects of induction heating process parameters on hardness profile of 4340 steel bearing shoulder using 2D axisymmetric model. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 4, 41-48.
- [66] Nemkov, V., Bukanin, V., Zenkov, A., & Ivanov, A. (2014, September). Simulation of induction heating of slabs using ELTA 6.0. In *Proc. of International Scientific Colloquium «Modelling for Electromagnetic Processing»* (pp. 113-118).
- [67] Barka, N., Ouafi, A. E., Chebak, A., Bocher, P., & Brousseau, J. (2012). Study of induction heating process applied to internal gear using 3D model. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 232, pp. 730-735). Trans Tech Publications Ltd.
- [68] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2019). Optimization of the edge effect of 4340 steel specimen heated by induction process with flux concentrators using finite element axis-symmetric simulation and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9), 4549-4557.
- [69] Nemkov, V., & Goldstein, R. (2003). Computer simulation for fundamental study and practical solutions to induction heating problems. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.
- [70] Myers, C., Osborn, J., Tiell, C., Goldstein, R., & Ruffini, R. T. (2006). Induction Heat Treating-Optimizing Performance of Crankshaft Hardening Inductors-Using Fluxtrol A in crankshaft induction coils resulted in a 100% improvement in coil lifetime while improving. *Industrial Heating*, 73(12), 43-50.
- [71] Baldan, M., Cetin, M., Nikanorov, A., & Nacke, B. (2019, September). Optimal Design of Magnetic Flux Concentrators in Induction Heating. In *2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)* (pp. 203-207). IEEE.

- [72] Li, F., Li, X., Zhu, T., & Rong, Y. (2013). Numerical simulation of the moving induction heating process with magnetic flux concentrator. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 907295.
- [73] Rudnev, V. (2004). An objective assessment of magnetic flux concentrators. *Heat treating progress*, 19-23.
- [74] Zhu, T., Feng, P., Li, X., Li, F., & Rong, Y. (2013, July). The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model. In *2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering* (pp. 123-127). IEEE.
- [75] Barka, N., Chebak, A., El Ouafi, A., Jahazi, M., & Menou, A. (2014). A new approach in optimizing the induction heating process using flux concentrators: application to 4340 steel spur gear. *Journal of materials engineering and performance*, 23(9), 3092-3099.
- [76] Barka, N., El Ouafi, A., Bocher, P., Brousseau, J., & Chebak, A. (2013). Explorative study and prediction of overtempering region of disc heated by induction process using 2D axisymmetric model and experimental tests. In *Advanced Materials Research* (Vol. 631, pp. 417-423). Trans Tech Publications Ltd.
- [77] Yuan, J., Kang, J., Rong, Y., & Sisson, R. D. (2003). FEM modeling of induction hardening processes in steel. *Journal of materials engineering and performance*, 12(5), 589-596.
- [78] Mott, R. L., Vavrek, E. M., & Wang, J. (2018). *Machine elements in mechanical design* (6th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- [79] Campbell, J., 1990. *Dibble Sticks, Donkeys, And Diesels*. Manila, Philippines: International Rice Research Institute
- [80] Collins, J., Busby, H. and Staab, G., 2010. *Mechanical Design Of Machine Elements And Machines*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [81] Harvey, P. D. (1982). *Engineering properties of steel*. Asm International , Metals Park, Ohio.

CHAPITRE 1

ÉTUDE DE L'EFFET DE L'UTILISATION D'UNE APPROCHE SÉQUENTIELLE À DOUBLE FRÉQUENCE DANS LE CHAUFFAGE PAR INDUCTION POUR LA TREMPÉ DU PROFIL D'UN PIGNON EN ACIER 4340 À L'AIDE D'UNE SIMULATION 3D ET D'UNE ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS

1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Les systèmes de modélisation et de simulation numériques ont fait leurs preuves dans l'amélioration de nombreux processus industriels productifs, en termes de visualisation complète du processus avant son exécution et d'économie de temps, d'efforts et d'argent. Ce chapitre décrit un système de modélisation et de simulation permettant de déterminer des paramètres importants dans la conception d'une trempe par induction, notamment la distribution de la température, qui détermine la zone de transition de phase, et la détermination de la dureté. Le chauffage par induction occupe une place importante à notre époque en raison de ses vastes applications industrielles dans de nombreux domaines, notamment le traitement thermique, le soudage, la fusion, le formage, le recuit, le revêtement et de nombreuses autres utilisations en termes de matériaux métalliques ferreux et non ferreux, car il permet d'obtenir un produit de haute qualité en peu de temps et de réduire la surface utilisée dans la production et le coût des outils. Il permet également une production de haute précision, la sécurité dans le processus industriel, et le processus peut être automatisé et contrôlé.

Cet article présente une nouvelle étude sur l'application de l'approche séquentielle à double fréquence dans le processus de trempe par induction, dans le but de créer un système de modélisation numérique qui sera un outil puissant pour l'analyse des processus intégrés de trempe par induction. Cette étude a été réalisée à l'aide d'un logiciel tridimensionnel COMSOL Multiphysics basé sur l'électromagnétisme et le transfert de chaleur étroitement couplés, appliqué à un pignon en acier 4340 durci par induction placé entre deux autres pignons de forme identique, qui agit comme un concentrateur de flux. Le but de cette étude est de déterminer ce que l'approche séquentielle à double fréquence, ses caractéristiques et ses avantages apportent au processus de trempe par induction, ainsi que la différence entre son utilisation et l'utilisation d'une seule fréquence. L'objectif principal de cette étude est l'obtention d'un profil de dureté optimale au milieu, et au bord, de la racine et de la pointe d'une dent de pignon de forme géométrique complexe. La simulation numérique a permis de bâtir un modèle capable de prédire en fonction des paramètres machine la distribution de la température, la courbe de dureté, la profondeur durcie et la région de surchauffe.

Sur la base des résultats observés, cette étude de recherche a prédit un avenir prometteur pour l'utilisation de l'approche séquentielle à double fréquence dans les processus de trempe par induction, en particulier pour les pièces mécaniques aux formes géométriques complexes. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité et la capacité de cette approche à atteindre le contour du profil de dureté et à réduire l'effet de bord électromagnétique.

Mots-clés : Chauffage par induction, séquentiel, double fréquence, pignon, contour, concentrateur de flux.

Ce premier article est intitulé « Étude De L'effet De L'utilisation D'une Approche Séquentielle À Double Fréquence Dans Le Chauffage Par Induction Pour La Trempe Du Profil D'un Pignon En Acier 4340 À L'aide D'une Simulation 3D Et D'une Analyse Par Éléments Finis ». Il a été co-écrit par le Professeur Nouredine Barka et moi-même. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2021 par le *Journal of Advanced Materials Research (AMR)*. Ma contribution à ce travail a été de faire une revue de la littérature, de rechercher les dernières découvertes des scientifiques, chercheurs et industriels sur la technologie utilisée dans cet article, de concevoir un modèle de simulation, de développer des approches, de récolter les résultats, de les organiser, et finalement de rédiger l'article. Le professeur Nouredine Barka a présenté l'idée originale et les modèles de simulation précédents qui ont été améliorés dans cet article. Il a également contribué à la gestion des données et à la révision de l'article.

1.2 STUDY THE EFFECT OF USING A SEQUENTIAL DUAL-FREQUENCY APPROACH IN INDUCTION HEATING FOR HARDENING THE PROFILE OF 4340 STEEL SPROCKET USING 3D SIMULATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS.

1.2.1 Abstract

Numerical modeling and simulation systems have proven themselves in improving many of the productive industrial processes, in terms of their complete visualization of the process before it is performed and in saving time, effort, and money. This chapter describes a modeling and simulation system for determining important parameters in the design of an induction hardening, particularly temperature distribution, which determines the phase transition area, and hardness determination. Induction heating occupies an important role in our time due to its wide industrial applications in many fields including heat treatment, welding, melting, forming, annealing, coating, and many other uses in terms of ferrous and nonferrous metallic materials, as it provides a high-quality product in a short time and reduces the area used in production and the cost of tools. It also provides high accuracy production, safety in the industrial process, and the process can be automated and controlled.

This paper provides a novel investigation into the application of the dual frequency sequential approach in the induction hardening process, with the goal of creating a numerical modeling system that will be a strong tool for the analysis of integrated induction hardening processes. This study was carried out by using a three-dimensional COMSOL Multiphysics software based on tightly coupled electromagnetism and heat transfer applied to an inductively hardened 4340 steel sprocket placed between two other sprockets with identical shapes, which acts as a flux concentrator. The purpose of this study is to determine what the sequential dual-frequency approach, its characteristics, and advantages contribute to the induction hardening process, as well as the difference between its usage and the use of a single frequency. The main objective of this study is to obtain an optimal hardness profile in the middle, and at the edge, of the root and tip of a geometrically complex sprocket tooth. The numerical simulation allowed to build a model able to predict, according to the machine parameters, the temperature distribution, the hardness curve, the hardened depth and the overtempering region.

Based on the observed results, this research study predicted a promising future for the use of the sequential dual-frequency approach in the induction hardening processes, especially for mechanical parts with complex geometric shapes. The obtained results demonstrated the efficacy and capability of this approach in attaining the contour pattern of the hardness profile and reducing the electromagnetic edge effect.

Keywords: Induction Heating, Sequential, Dual-frequency, Sprocket, Contour, Flux Concentrator.

1.2.2 Introduction

Surface hardening, also known as case hardening, is one of the technical applications of induction heating that tries to enhance both surface hardness and fatigue life for steel alloys. It is based on the property of the electromagnetic skin effect, which works to generate heat in the electrically conductive workpiece due to eddy currents induced in it. According to the French physicist L. Foucault, the produced currents are also known as Foucault currents. The skin effect is linked to the frequency current flowing primarily at the conductor's "skin," at an average depth known as the skin penetration (or reference) depth. The skin penetration depth formula is written as $\delta = \sqrt{\rho/\mu_r f}$ [1-3].

Where the skin depth depends on the frequency f of alternating current of the coil, the electrical resistivity ρ , and relative magnetic permeability μ_r of the workpiece [2].

Induction Hardening may be defined as a process by which a ferrous material is hardened so that the surface layer, known as the case, becomes substantially harder than the remaining material, known as the core [4]. The process of hardening using induction heating has several benefits that make it preferable to other methods, particularly the providing of superior mechanical characteristics that cannot be achieved using other types of heating, such as (gas-fired furnace techniques) [5]. Induction hardening has proved itself in the hardening of metals, specially those with complicated geometrical shapes such as gears because they are not linked and only concentrate on hardening the metal surface. As a result, they save resources and costs, are quick, and assist in high production rates. They may also be utilized in a production line. It is an ecologically beneficial technique since it does not use oil or gas, and it is characterized by simplicity of automation and control, as well as a low maintenance need [4, 6-7].

In this work, induction heating process is applied to a sprocket, as the sprockets are mechanical drive with immovable axes - classical mechanical drives - fall into transmission using mesh with flexible connection (chain drive or synchronous belts), and the mutual position of driving wheel and the driven wheel is indirect. On the other hand, the sprocket known as toothed wheels provides a positive mechanical drive desirable at the low-speed, high torque conditions [8-10]. They are classified as a transmission shaft, which is a revolving machine part with a circular cross-section [11]. Since it is a stand-alone type that cannot be considered as a pulley and cannot be considered as a type of gear, because sprockets differ from a pulley in having teeth and are used to engage with a chain, where the chain converts the rotational power to the pulling power or pulling power to rotational power, and the pulley is smooth this gives the advantage of non-slip or creep to the sprocket [11-12]. Sprockets are also different from gear as they mesh with an 'intermediate' link, namely chain or synchronous belts, which in turn meshes with another sprocket. Where Sprocket is called the roller chain drive, but the gear meshes with another gear. Thus, chain drives can be used over a wide range of center distances [9-11, 13].

The main characteristic of induction hardening is the formation of a residual stress state on the surface as well as the formation of a residual stress distribution under the surface, both of which are helpful for calculating the force of contact fatigue strength. Where compressive stresses assist

to prevent fracture formation and resist tensile bending fatigue, taking into account that induction hardening produces an undesirable tensile residual stress distribution on the surface. Since a consequence, the hardening process must be well controlled, as one of the most essential elements of induction hardening is ensuring a small variation in hardness and the presence of compressive residual stresses in the transition areas to the hardness of the base material [2, 7]. As a consequence, the induction hardening process has a significant impact on the quantity and distribution of residual stresses, and excessive non-martensite phase growth may sometimes result in residual tension stress at the surface [14-15].

As a result, we need a contour pattern for the case depth that ensures a fine grain martensitic layer on certain regions of the part while leaving the rest of the part unaffected by the induction process [16]. The body of the sprocket is provided with drilled holes of the required form and size, shut with lids or plugs, nipples, and so on, for the purpose of inspection, oil filling/draining, mounting of an all-level thermometer, easier removal of the cover, and more convenient clamping of sprockets on the machine tool [8]. Drilling big diameter holes parallel to the axis of rotation may sometimes be used to decrease the weight of the sprockets [8, 17]. Sometimes holes and drilling are utilized to reduce the highest stress in the sprocket tooth profile [18-19]. We seek to obtain the best contour profile for temperature distribution and the hardened area on the teeth of sprockets as a result of all these complexities in the geometry in the design of gears and sprockets, and because the surface condition of the part to be hardened affects the heat treatment process and workpiece life during service. Because the induction hardening process is affected by the existence of holes and cutouts between the hub and the tooth. The impact of such holes and cutouts becomes nil if the hardened region has a suitable and uniform contour profile pattern [2, 20].

The concept of using dual-frequency was developed in the late 1950s, and they invested in it to profit from it in the induction hardening process. As a result, it was utilized in pulsing dual-frequency concept (PDFC) induction hardening machines, which work on a two-step heating system, each with a distinct frequency, heating duration, and power machine [2]. The most significant reason for using PDFC was to produce consistent heat source distribution and a uniform contour hardened profile for gear, which could not be accomplished by merely changing the power level or any other methods in induction hardening techniques that utilize just a single frequency. However, there is a time delay (dwell time) between the application of the two frequencies in the heating process in this approach, which may have a negative effect on producing a contour hardened profile and is also a time and effort demanding method [21-22]. As a consequence, this technique has undergone many improvements until a new concept in the usage of dual-frequency termed simultaneous dual-frequency hardening (SDFC) emerged, which employs two single-frequency inverters operating on the same coil simultaneously. Low-frequency aids in the austenitization of the teeth' roots, whereas high-frequency aids in the austenitization of the teeth' flanks and tips. However, based on experience, it has been shown that, depending on the geometry of the workpiece, having two frequencies working at the same time is not always beneficial [23-24]. Because of these limitations in both PDFC and simultaneous dual-frequency, the focus of this study in this research was directed to apply the dual-frequency sequentially in the induction hardening process. That is, since it is a technique derived from the PDFC method, there is no time delay between applying the two distinct frequencies, and the two frequencies do not operate

together simultaneously. To achieve the optimum contour pattern for the hardened region, it is generally better to utilize a lower frequency at first and then a higher frequency after reaching the required root heating to complete the hardening process [22].

The edge effect is one of the most common unwanted phenomena caused by the distortion of the magnetic field at a workpiece's ends and edges [25]. In this study, flux concentrators were utilized to collect the flux field generated during induction heating in order to guarantee a quasi-uniform martensite layer on the surface of the sprocket tooth after cooling and to regulate induced current penetration and temperature distortion. To provide a uniform contour profile and a quasi-uniform martensite layer on the surface of the sprocket tooth after cooling, the flux concentrators technique was employed in this research to collect the flux field generated during induction heating by providing a better route for magnetic flux lines [21, 26].

Induction hardening applications are still dependent on trial-and-error techniques in many sectors, which is an economic drain on all material elements and makes the induction hardening process an industrially costly process. This is a compelling reason for engineers to become involved in the creation of models for numerical simulations of the induction hardening process, selecting the best parameters for each application, and testing the findings before putting them into practical implementation. On the other hand, there is a scarcity of studies into sprocket heat treatment, despite the fact that it is just as essential as any other kind of transmission shaft, since sprockets are widely utilized in the transportation sector, including bicycles, motorcycles, snowmobiles, tanks, and automobiles. They are used to transmit power in metal and woodworking machines [10, 13]. Agricultural machinery, oil-well drilling rigs, building construction, hoists, and materials handling equipment all utilize them [27-30].

Because sprockets have a wide range of applications and are used in a variety of industries, it was necessary to conduct a thorough investigation into the best induction heat treatment methods for obtaining the best temperature distribution on the profile of the sprockets, the best-case depth, and the best way to control the profile hardening. Several studies have been conducted on developing, designing, and controlling the power supply of dual frequency induction hardening machines [31, 32].

In their study, V. Esteve et al. [33] focused at the economic feasibility of using dual-frequency instead of single-frequency in the induction heating process, and discovered that using dual-frequency in the induction hardening process for parts with difficult, complex, or irregular geometry is the most cost-effective solution in terms of heating time and hardening quality. Many heat treatment investigations are focused on achieving a uniform temperature distribution on the surface and obtaining the contour pattern of the hardened profile. which employs induction hardening of complex geometry shapes, particularly gears and gear-like parts, by modifying geometrical factors such as the gap between the main part and the inductor and the gap between the main part and magnetic flux concentrators, as well as machine parameters such as frequency, external current density, coil type, and heating time [33-36]. The impact of frequency on temperature distribution and profile hardness was emphasized by Habib [37]. Induction heating was utilized by Jin-Kyu Choi et al. [38] to estimate the hardened depth of heat-treated sprockets using finite element analysis (FEA) and finite element method (FEM). They used a single

frequency of 80 kHz for 30 seconds in their study, which is considered a longer period when compared to the effectiveness and efficiency of induction heating in metallurgical quality. The surface layer that has to be toughened is heated quickly to reach the austenitic phase in order to minimize component deformation to a minimum after the heat treatment process. The heating rate is extremely rapid in modern induction heating applications, reaching about 5000 °C/s in less than one second [2]. Previous studies focused on the utilization of high and medium frequencies in the induction heating process. However, in those researches, there was a gap in time without applying any energy in dwell time between the application of both frequencies. Despite that these studies used the classical dual-frequency technique, fundamental concepts that are extremely helpful in using the dual-frequency approach in induction heating were discovered [39, 40]. According to Rudnev, the use of two distinct frequencies operating at the same time is not appropriate for all induction hardening applications [24].

The main aim of this research was to develop a 3D FEM model that could be used in COMSOL software simulation to apply induction hardening to sprocket teeth using a sequential dual-frequency approach. To understand what benefit this approach provides, its features, effectiveness, and flexibility in controlling the case depth in induction hardening of complex geometric shapes, and recognize its critical importance in achieving a uniform temperature distribution and thus obtaining the best contour profile hardness pattern.

This was accomplished in this article in many stages, beginning with a method to enhance the model's simulation results and calibrate the parameters using experimental data in order to achieve a reference temperature in both medium and high frequency. Then simulations were required to demonstrate the problem of using only one frequency in the induction process, as well as to demonstrate that it is extremely difficult to achieve complete transformation of the austenite phase of surfaces with complex geometric shapes, and to ensure that no point on the surface becomes a melting point, making contour pattern for hardened profile impossible. Then a study was carried out to make the induction heating process operate on a sequential dual-frequency approach, with studies based on experimental feasibility to achieve the maximum and minimum temperature limitations on the tooth profile. At each temperature limit, the case depth of the hardened area is monitored. The frequency, heating time, imposed current density, and distance between the main part and the flux concentrators were the factors involved and altered in the induction heating process. It was necessary to perform a study on the effect of the sequential dual-frequency on the hardness with depth curve in order to make this a complete study of the effect of the sequential dual-frequency on the induction hardening process.

1.2.3 Formula

Induction heating is a technique that uses an alternating current (AC) magnetic field to generate power in an electrically conducting charge [3]. A space–time temperature distribution inside a heated workpiece is represented by a very complex set of interconnected Maxwell's and Fourier equations for electromagnetic and temperature fields [21] in the numerical modeling of the induction heating process [41]. Because the quantities of the time-varying electromagnetic field in Maxwell's equations are functions that oscillate harmoniously with a single frequency, we may examine the regularity of Maxwell's equation solutions without considering displacement fields. Because the conduction current density is considerably higher than the displacement current density [3], and by adding the magnetic vector potential A related to the magnetic flux, the general equation describing electromagnetic behavior may be simplified to diffusion equation as follows [3, 42-44]:

$$\frac{1}{\mu\mu_0} \nabla^2 A = -J_s + j\omega\sigma A \quad (1)$$

Where the parameters μ_r and σ denote respectively the relative magnetic permeability, and electrical conductivity of the material. The constant μ_0 expresses the vacuum permeability. As magnetic permeability determines a material's response to an applied magnetic field. The J_s and ω describe respectively the source current density in the coil and the angular frequency of the current, whereas ω (rad/s) = $2\pi f$, and f is the current frequency used by generator.

Therefore, from **Equation (1)**, eddy current density J_e is expressed in terms of the magnetic vector potential A given by the electromagnetic analysis as shown in the following equation:

$$J_e = -j\omega\sigma A \quad (2)$$

From the other side, the amount of heat generated inside the workpiece due to Joule-Lenz heating is evaluated by the following equation which shows the heat generated can be expressed as a function of the eddy current density obtained from **Equation (2)**, which can be resolved by the magnetic vector potential A :

$$\dot{Q}_{\text{ind}} = \int_v |J_e|^2 \sigma^{-1} \cdot dv \quad (3)$$

Where Q_{ind} denotes the Joule heat generated by the electromagnetic process. The transient (time-dependent) heat transfer equation with phase change governs heat transfer inside the workpiece, where heat conduction transfer is expressed using Fourier's equation in a three-dimensional continuum and is given by [31]:

$$\gamma C_\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla \theta) + \dot{Q}_{\text{ind}} \quad (4)$$

Here θ express the temperature. k , C_ρ , and γ are physical properties that are local temperature-dependent and therefore non-linear functions of temperature, representing the thermal conductivity, specific heat, and mass density of workpiece material, respectively.

The heat transfer by convection and radiation in the induction heating process typically reflects the value of energy loss, but the energy lost by convection and radiation is negligible [45], because the established temperature for hardening steel 4340 is much higher than 350°C, so convection is approximated to conduction between workpiece and surrounding air. Because of the short time of heating using the induction method, the energy loss by radiation is extremely minimal [2].

Regardless, the energy lost via convection and radiation should be included in numerical calculations using the finite element method. In order for the findings to be realistic and closely related to the experimental data. As a result, the thermal problem's boundary conditions are described by the heat flux Φ_{th} transmitted by radiation and convection from the workpiece surface to the surrounding air using the following equation:

$$\Phi_{th} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{con} \quad (5)$$

The convection heat flux loss equation under Newton's cooling law is given by the following equation:

$$\dot{Q}_{con} = \alpha_c(\theta - \theta_a) \quad (6)$$

With α_c is the convection coefficient, θ and θ_a Celsius temperatures of the surface and the surrounding ambient. Whereas, the loss of heat flux by radiation emitted described by Stefan–Boltzmann law as follow equation:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma_s(T^4 - T_a^4) \quad (7)$$

With ε is the emissivity, σ_s is the Stefan–Boltzmann constant and T and T_a absolute temperatures of the surface and the surrounding ambient. A time-temperature-transformation (T-T-T) diagram for steels with different carbon contents were used as the fundamental data [46].

The approach used to predict the overtempering region was followed by predicting the expected hardness curve for the hardened profile after cooling. Where d_s represent the case depth, which it is the regions heated above A_{c3} , d_L represents the depth measured at the point recording the low hardness value, in which the regions are heated between A_{c1} and A_{c3} , whereas A_{c1} and A_{c3} are critical transformation temperature of 825°C and 850°C respectively, and d_C represents the depth, that expresses the all of the area affected by the induction heating, which it is determined by the areas heated above the temperature of 600°C. Finally, the overtempered region can be defined by the difference between the d_s and d_C [47].

1.2.4 Simulation Model

The geometry of sprocket teeth differs from the geometry of spur gear teeth, where the distance between the tip and the root of the sprocket is larger than the distance between the tip and the root of the spur gear tooth, that because the teeth of the sprockets were designed to suiting between inner link plates of the chain. Sometimes even the wear that occurs between the pins and bushings in the roller chains is compensated by increasing the distance between the sprocket teeth [13, 28, 48].

Because of the variations in geometric shape and distance between the tip and the root in sprockets, it was more difficult to achieve a uniform surface temperature between the tip and the root, as well as between the edge and the middle of the tooth after heating (contour hardness profile pattern). Therefore, the surfaces of the piece must be heated while keeping the temperature limitations in mind in order to get the optimum contour of temperature distribution and heat treatment possible.

The concept behind induction hardening is to heat the part's surface to the temperature required to change the material's metallurgical structure to the austenitic structure while avoiding overheating in the main sprocket over the melting temperature.

1.2.4.1 Geometry

For this numerical simulation, a sprocket specimen with 24 teeth and an outside diameter of 104 mm, an inner diameter of 16 mm, and a thickness of 7 mm was utilized.

The simulations are carried out utilizing the COMSOL Multiphysics software (3D Model) and a finite element simulation based on electromagnetism and heat transfer studies. The inductor was designed as a solid section of copper with 110 mm inner diameter, 140 mm outer diameter, and a thickness of 7mm. The model was created in an environment (Air) while accounting for its dielectric permeability ($\mu_r = 1$) and vacuum permittivity ($\epsilon_r = 1$).

Magnetic concentrators were added to control and concentrate electromagnetic waves on specific areas of the tooth, as Barka et al. [49] assisted us by adding two flux concentrators with identical geometry from the main tooth. The model employs symmetric conditions, which are resumed by electric and thermal insulation. These advantageous circumstances assist in reducing the geometries of the sprocket tooth, coil, and flux concentrators to half.

Furthermore, as illustrated in Figure 1.2, the periodic conditions are advantageously exploited in order to reduce the half of the main sprocket tooth as well as the coil to a simpler quarter geometry. This method significantly reduces computing time while also improving the accuracy of simulation results by increasing mesh quality.

1.2.4.2 Material

AISI 4340 steel was used in FE studies, which has a carbon content between (0.38% - 0.43%) WT [50]. Based on the carbon content of this homogeneous and isotropic material, adherence to thermal restrictions is required to ensure that metallurgy is transforming to the austenitic structure while also ensuring that the heating of the concerned part does not reach the melting temperature; therefore, knowledge of the typical configuration of AISI 4340 is required.

1.2.4.3 Meshing

The FEM Computation procedure begins by subdividing the geometry of the problem at hand into multiple subdivisions, a process known as meshing. A convergence study was conducted out for the mesh size value varies between (0.1mm and 1mm) through refining step by step of 0.05 mm, in order to select the best mesh size that offers stability and accuracy in results, as well as not wasting time in computing. Based on the findings, the temperature and induced current density stabilized at a mesh size of 0.5 mm, as shown in [Figure 1.1](#), which depicts a model with an optimized computational mesh with a mesh-size of 0.5 mm at the main sprocket tooth, flux concentrator, and induction coil.

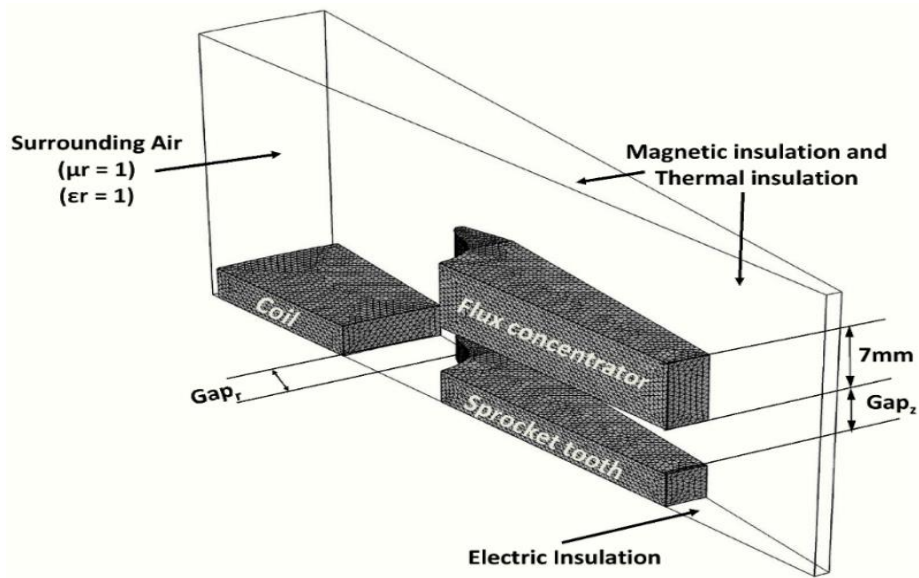


Figure 1.1 3D FE model of induction heating with flux concentrator and final mesh.

1.2.4.4 Model Validity

The model on which this study will be conducted was designed and developed based on an existing and experimentally investigated spur gear model before, where Khalifa et al. [34] tested this model experimentally and verified its validity for reduction edge effect in the induction hardening process.

The method of validating the spur gear model was based on the approach of Barka et al. [51] which used to establish a relationship that represents the ratio between the imposed current density applied in FE simulation and the power provided by the induction machine into the inductor coil; this is the ratio that will also be used in this study between the imposed current density and the machine power. In order for this relationship to assist in the application of the parameters investigated by FE simulation on the induction heating machine.

1.2.5 Results and Discussion

Initially, the medium and high frequencies were examined individually in order to determine how temperature is distributed in each of them and to reach at a reference temperature of 1000 °C. In the second step, the application of sequential dual-frequency to the workpiece during the induction hardening process was investigated.

1.2.5.1 Single Frequency Heating (MF and HF)

The process was simulated and studied with several parameter variations in the medium frequency MF study (10 kHz) to determine how to distribute the temperature and depth of the hardened region around the profile of the primary sprocket tooth. The austenite degree temperature can be achieved on the top and root of the main sprocket tooth with a temperature difference of approximately 430 °C, as illustrated in Figure 1.2. However, in order to reach this temperature, we heated the majority of the part, and we did not get a contour profile, causing us to deviate from the basic concept of induction hardening and the aim of this study.

As a result, the required temperature of 1000 °C was only reached at the root zone of the tooth, as shown in Figure 1.3. When the parameters are set at 4.17×10^{10} A.m⁻² for the imposed current density J_s , 0.5 s for the heating time (t_c), 3.18 mm for the radial gap between the main sprocket tooth and the induction coil (Gap_r), and 0.6 mm for the flux concentrator gap (Gap_z).

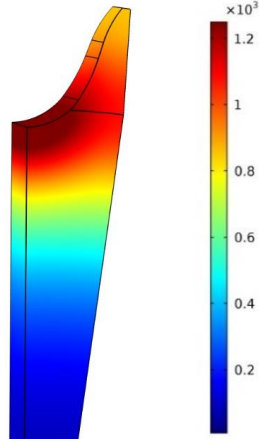


Figure 1.2 *The part heating problem when reaching the austenitic temperature at the tip and the root using single MF.*

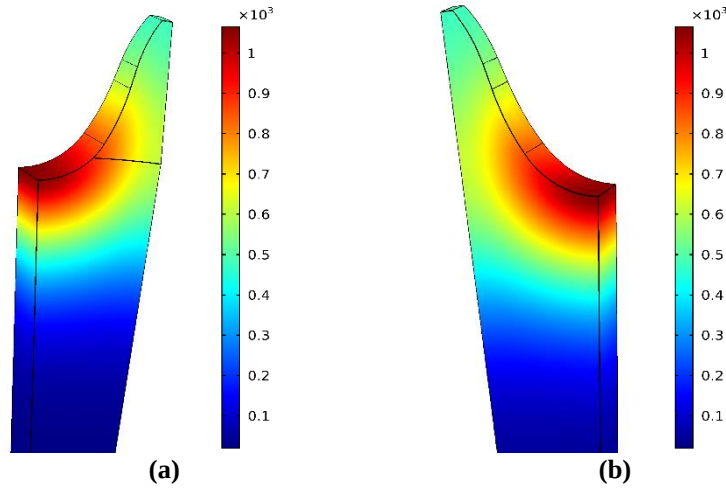


Figure 1.3 *Temperature ($^{\circ}\text{C}$) distribution at the end of heating at MF case. a) Edge. b) Middle.*

The high-frequency HF (200 kHz) was next investigated, and when the parameters were set as follows: the imposed current density J_s at $14.7 \times 10^{10} \text{ A.m}^{-2}$, t_c at 0.5 s, Gap_z at 0.4 mm, and Gap_r is fixed at 3.18 mm, the reference temperature 1000°C was only reached at the tip zone shown in [Figure 1.4](#). Despite studying many parameters in the process, the austenite degree temperature has not been reached at both the tip and the root of the main sprocket tooth, because there is a big difference between the tip temperature and the root temperature reaching about 490°C , which led to the tip temperature reaching to a degree of melting point before the root temperature reaches austenite degree. [Figure 1.5](#) shows the evaluation of the temperature over time when either medium or high single frequency is applied for heat treatment of sprocket tooth.

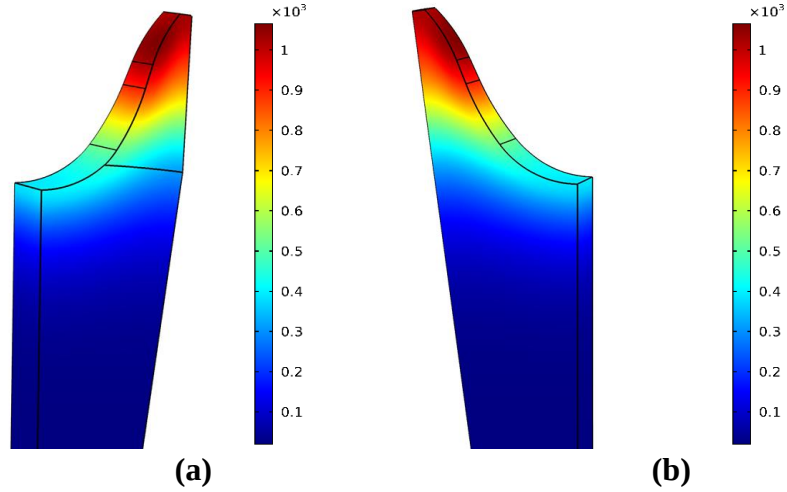


Figure 1.4 Temperature ($^{\circ}\text{C}$) distribution at the end of heating at HF Case.
a) Edge. b) Middle.

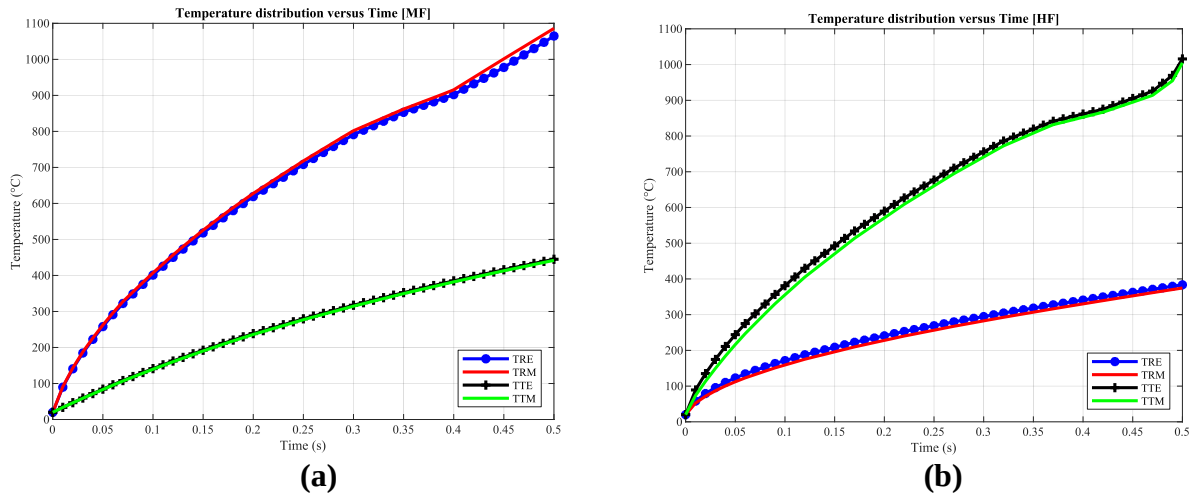


Figure 1.5 Temperature ($^{\circ}\text{C}$) distribution with heating time (s) when applying:
a) MF. b) HF.

1.2.5.2 Sequential Dual Frequency Heating

Based on what has been studied and investigated in both the HF and MF individually, it has been discovered that the obtained hardness contour pattern needed for the induction hardening process is not feasible. Even if we get a sufficient distribute heat to the austenite degree, a hardening condition that satisfies the fundamental requirements of contouring pattern and basic characteristics of the induction hardening process is not achieved.

In the sequential dual-frequency study, the parameters of the induction hardening process as shown in [Table 1.1](#) were modified by simulating experimental feasibility. Various statistical tools were

used to analyze the obtained results. In which we note that the temporal and geometrical parameters are fixed, and the imposed current density J_s was adjusted to reach the minimum and maximum temperatures at which steel 4340 transitions to the austenite phase completely away from the melting point. After that, an average temperature of 1150 °C was taken between them to demonstrate the flexibility in regulating temperature distribution and case depth across the profile contour of the main sprocket tooth while using sequential dual-frequency in the induction hardening process.

Figures 1.6, 1.7, and 1.8 show the results of FE modeling for three temperature distribution cases when simulating the dual-frequency sequentially in the process of induction hardening when the temperature at the root and tip are at the upper, medium, and low temperature ranges of the austenite phase of steel 4340. These temperature limitations ensure that the austenite phase completely transforms away from the melting point and form it to martensite after quenching.

Table 1.1 Simulation parameters when applying the sequential dual-frequency approach.

Temperature range	Sequence frequency	$J_s \times 10^{10} \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$	$t_c \text{ (s)}$	Gap _z (mm)	Gap _r (mm)
Min limit	HF	16.89	0.2	0.6	3.18
	MF	3.785	0.3		
Medium	HF	20.80	0.2	0.6	3.18
	MF	3.90	0.3		
Max limit	HF	23.50	0.2	0.6	3.18
	MF	3.99	0.3		

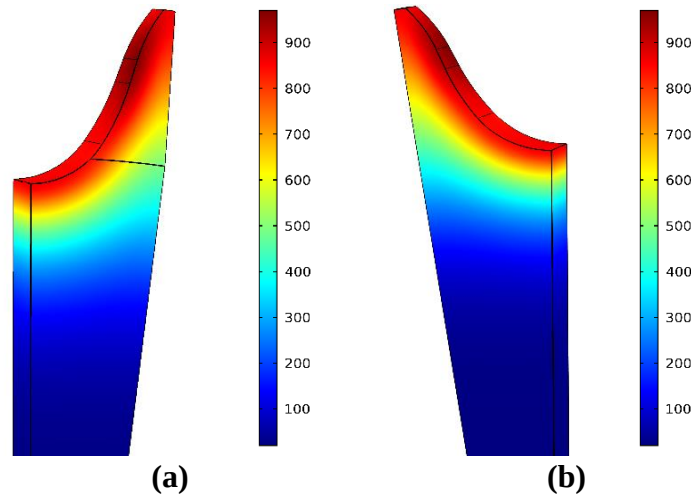


Figure 1.6 Minimum Temperature (°C) distribution at the end of heating when applying sequential dual-frequency approach at: a) Edge part. b) Middle part.

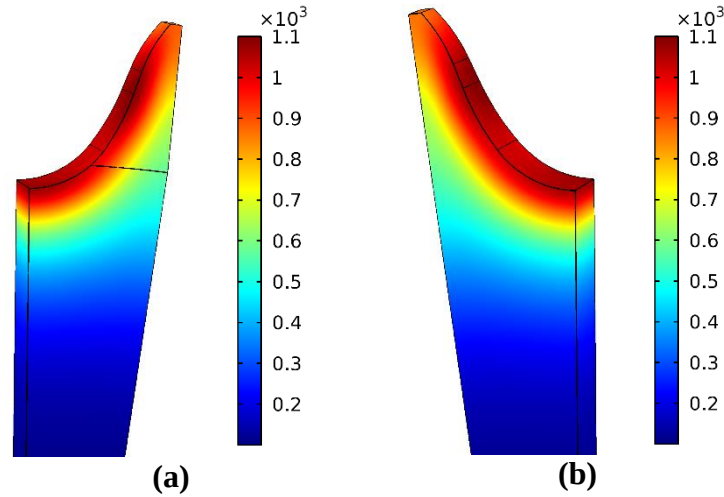


Figure 1.7 *Medium Temperature (°C) distribution at the end of heating when applying sequential dual-frequency approach at: a) Edge part. b) Middle part.*

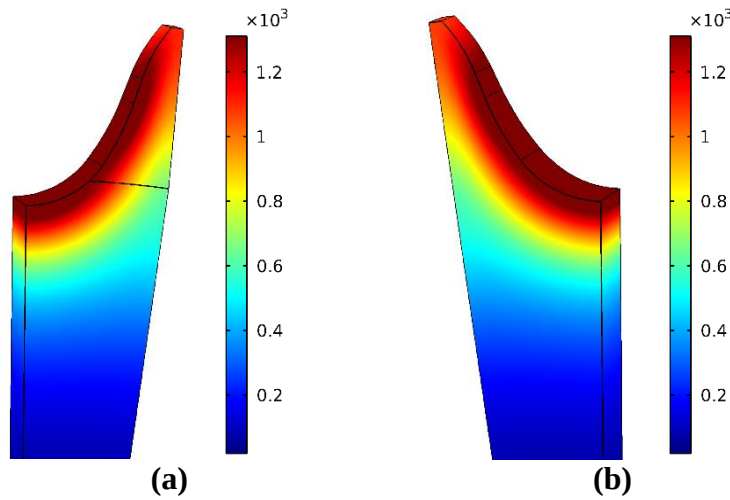


Figure 1.8 *Maximum Temperature (°C) distribution at the end of heating when applying sequential dual-frequency approach at: a) Edge part. b) Middle part.*

Figures 1.9, 1.10, and 1.11 show the temperature with heating time for each of the three cases of temperature distribution at the four locations where the temperature was studied and observed on the sprocket tooth, which are the temperature at the root of the edge area (TRE), the temperature at the root of the middle area (TRM), the temperature at the tip of the edge area (TTE) and the temperature at the root of the middle area (TTM).

The temperature and time curves are nonlinear to a large extent, as shown by three graphs, due to the nonlinear nature of the electromagnetic and thermal properties.

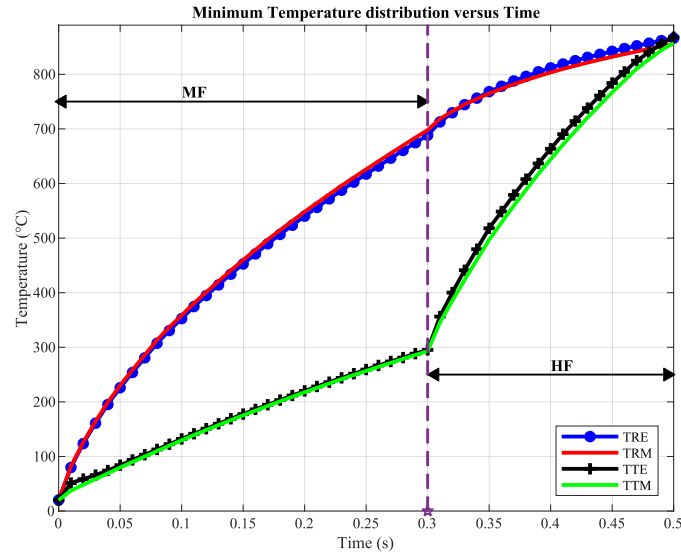


Figure 1.9 Minimum Temperature ($^{\circ}\text{C}$) distribution with heating time (s) when applying sequential dual-frequency approach.

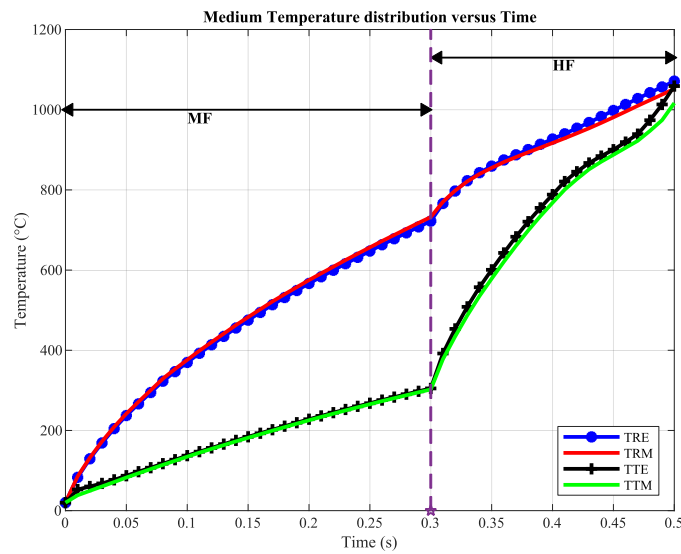


Figure 1.10 Medium Temperature ($^{\circ}\text{C}$) distribution with heating time (s) when applying sequential dual-frequency approach.

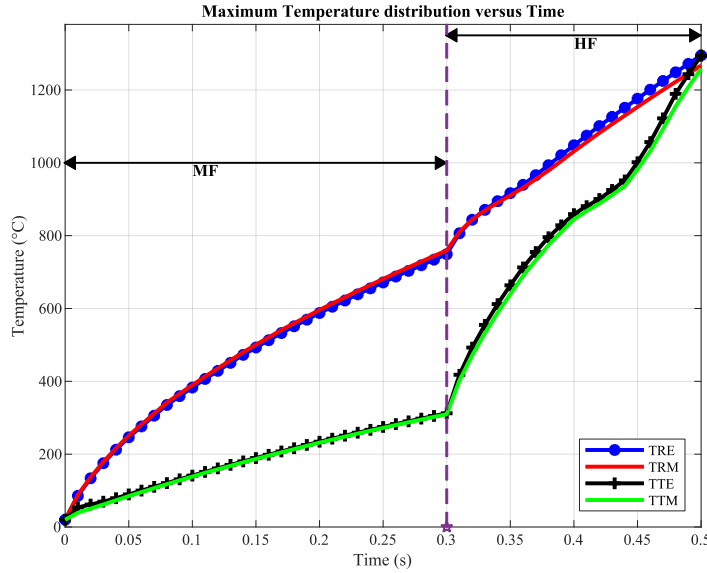
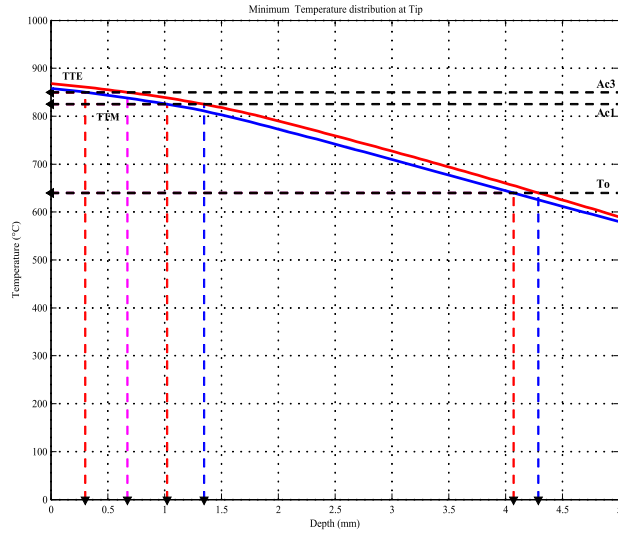
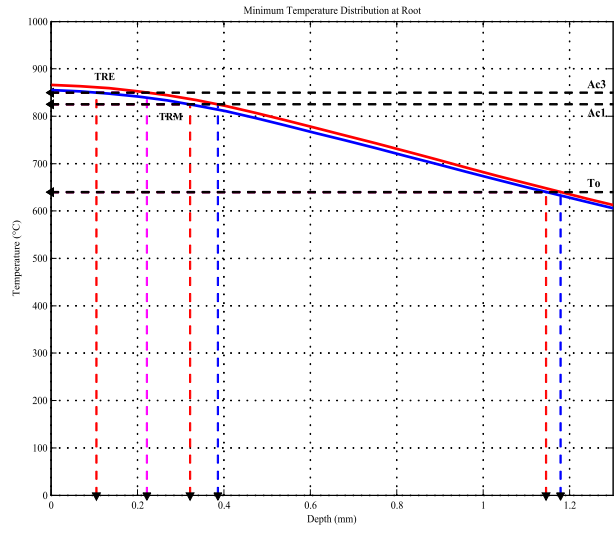


Figure 1.11 Maximum Temperature ($^{\circ}\text{C}$) distribution with heating time (s) when applying sequential dual-frequency approach.

In addition to the effect of the sequential dual-frequency on the temperature curve with depth shown in [Figures \(1.12-1.14\)](#), it has been observed that using the sequential dual-frequency approach in the induction hardening process will provide us with a high degree of control over the hardness curve of the hardened profile. The approximate visualization of the hardness curve for the maximum heat distribution of the sprocket tooth tip at the edge is shown in [Figure 1.15](#). The results shown in [Table 1.2](#) provided the best evidence that increasing the heating time at high frequency in the same period and increasing the imposed current intensity positively affect the induction heating process by reducing the overtempering region. The results will be exploited in future research investigations.

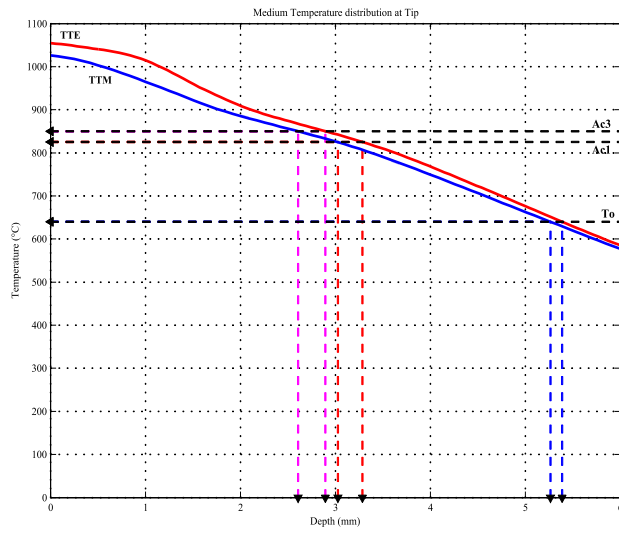


(a)

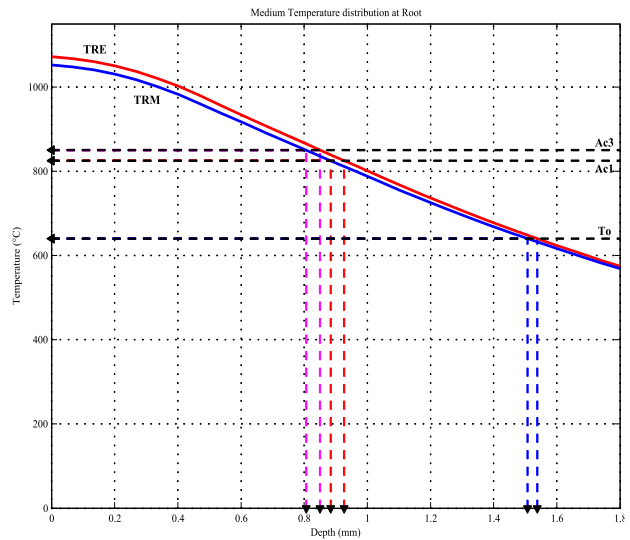


(b)

Figure 1.12 Minimum Temperature (°C) distribution with depth (mm) when applying sequential dual-frequency approach at: a) Tip. b) Root.



(a)



(b)

Figure 1.13 Medium Temperature (°C) distribution with depth (mm) when applying sequential dual-frequency approach at: a) Tip. b) Root.

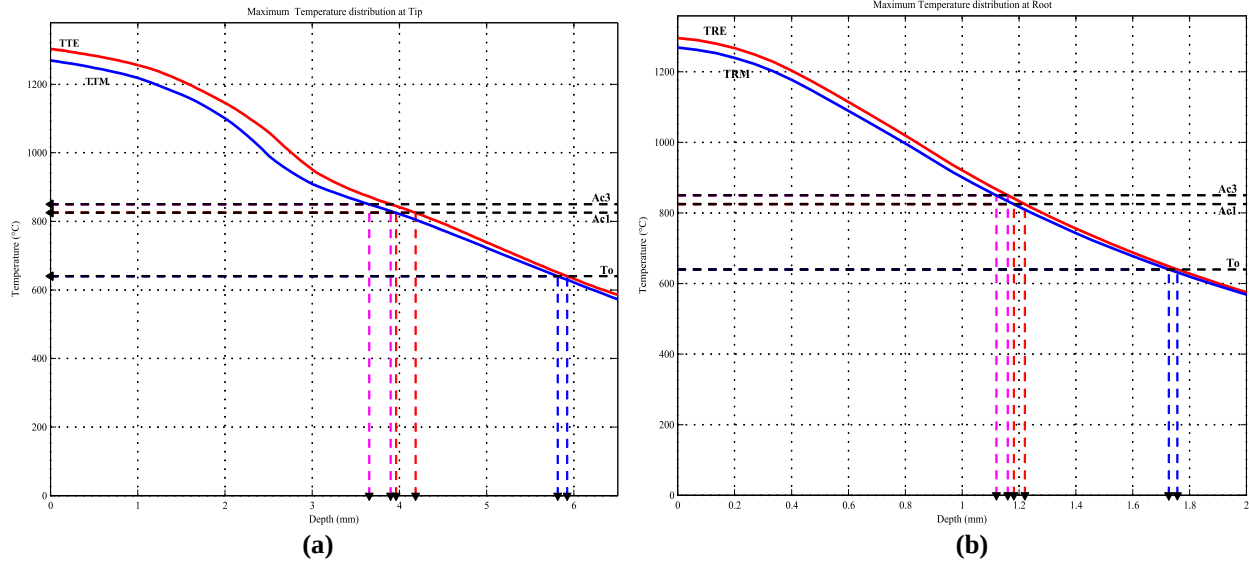


Figure 1.14 Maximum Temperature (°C) distribution with depth (mm) when applying sequential dual-frequency approach at: a) Tip. b) Root.

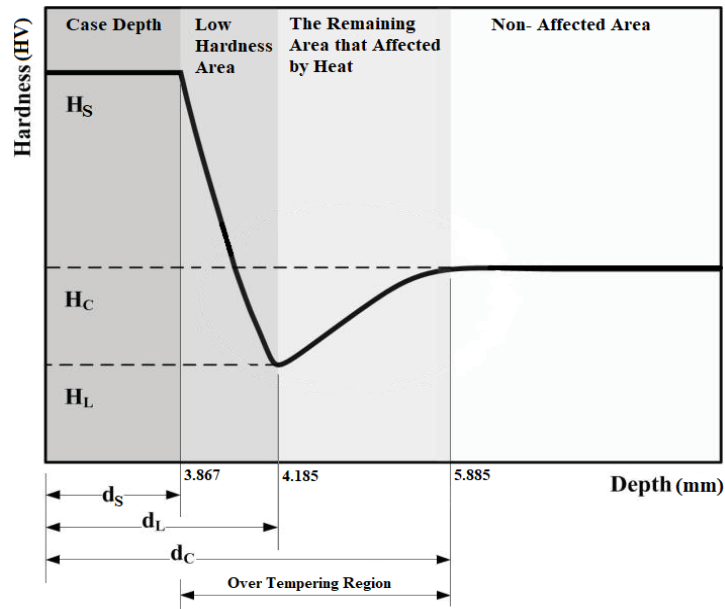


Figure 1.15 The expected hardness curve for the hardened profile of the sprocket at the edge of the tip in the case of the maximum temperature distribution.

Table 1.2 *Simulation depth results when applying the sequential dual-frequency approach.*

	Min				Mid				Max			
	TIP		ROOT		TIP		ROOT		TIP		ROOT	
	Edge	Middle	Edge	Middle	Edge	Middle	Edge	Middle	Edge	Middle	Edge	Middle
d_s (mm)	0.673	0.251	0.200	0.067	2.858	2.589	0.852	0.752	3.867	3.593	1.179	1.104
d_c (mm)	4.259	4.000	1.174	1.104	5.380	5.262	1.526	1.456	5.885	5.763	1.738	1.667
d_i(mm)	1.347	1.024	0.386	0.322	3.284	3.027	0.927	0.884	4.185	3.950	1.220	1.182
overt tempring	3.586	3.749	0.974	1.037	2.522	2.673	0.674	0.704	2.018	2.170	0.559	0.563

1.2.6 Conclusions

This study presented a numerical FE simulation of the use of a sequential dual-frequency approach in an induction heating system to improve the induction hardening process for complex geometries by obtaining the best contour pattern of the hardness profile and the highest flexibility in controlling the hardening area, as well as the best uniform contour distribution of temperature around the profile to be hardened.

The purpose of this study was to discover a clear visualization of the characteristics of utilizing the sequential dual-frequency approach in induction heating by evaluating the FE model capable of describing with sufficient precision a sample of sprocket with a complex geometrical shape. Furthermore, to conclude its benefits in obtaining the best hardness pattern.

It was found from this study that the sequential dual-frequency approach can be used in hardening all complex engineering shapes and complex geometry surface shaft-like components with numerous radial and longitudinal holes, shoulders, undercuts, and diameter changes. Nevertheless, a dual-frequency concept can be beneficial in many applications including through heating of relatively thin products or materials that exhibit low toughness.

When utilizing the sequential dual-frequency method in induction hardening, the obtained results demonstrated the flexibility of adjusting the hardness pattern and the uniform distribution of temperature around the profile.

Additionally, the findings indicated a promising future for the application of sequential dual-frequency in induction hardening. Particularly because of some optimization methods that might be utilized to find the optimum parameters as a function of the unified and contoured profile toughened by the sequential dual-frequency induction procedure.

1.2.7 Références Bibliographiques

- [1] Rodríguez, A. A., & Valli, A. (2010). *Eddy current approximation of Maxwell Equations: Theory, algorithms and applications*. Milan, New York: Springer.
- [2] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). *Handbook of Induction Heating* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [3] Lupi, S., Forzan, M., & Aliferov, A. (2015). Induction and direct resistance heating. *Switzerland: Springer*.
- [4] Dossett, J. L., & Boyer, H. E. (2006). *Practical heat treating*. Asm International.
- [5] Haimbaugh, R. E. (2015). *Practical Induction Heat Treating*. 2nd ed. Materials Park, Ohio: ASM International.
- [6] Zinn, S. and Semiatin, S., 1988. *Elements Of Induction Heating: Design, Control, And Applications*. Metals Park, OH: ASM.
- [7] Totten, G., Howes, M. and Inoue, T., 2002. *Handbook Of Residual Stress And Deformation Of Steel*. Materials Park, OH: ASM International.
- [8] Jelaska, D. T. (2012). *Gears and gear drives*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- [9] Mott, R. L., Vavrek, E. M., & Wang, J. (2018). *Machine elements in mechanical design* (6th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- [10] Collins, J., Busby, H. and Staab, G., 2010. *Mechanical Design Of Machine Elements And Machines*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [11] Bhandari, V., 2010. *Design Of Machine Elements*. 3rd ed. McGraw-Hill Education - Europe: McGraw-Hill Education (India).
- [12] Kanehira, M. and Otoshi, K., 1997. *The Complete Guide To Chain*. Wheeling, IL: US Tsubaki.
- [13] Sergeev, S. A., & Moskalev, D. V. (2009). Parametric optimization of chain-transmission sprockets. *Russian Engineering Research*, 29(5), 452-455.
- [14] Grum, J., 2003. Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction surface hardening and finish grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(3), pp.173-182.
- [15] Cohen, J., Funatani, K., Bell, T. and Totten, G., 2000. *Heat Treating: Advances In Surface Engineering: An International Symposium In Honor Of Professor Tom Bell And Professor Jerome B. Cohen Memorial Symposium On Residual Stresses In The Heat Treatment In*. Materials Park, OH, St. Louis, Mo: ASM International.
- [16] Brayman, S., Kuznetsov, A., Nikitin, S., Binoniemi, B., & Rudnev, V. (2011). Cost effective technology for induction contour hardening of bevel, hypoid, and pinion gears. In *Heat Treating 2011: Proceedings of the 26th Conference* (p. 151). ASM International.
- [17] Watson, H. J. (1970). *Modern Gear Production*. 1st ed. Burlington: Elsevier Science.
- [18] Abu-Hamdeh, N. H., & Alharthy, M. A. (2014, February). A Study on the Influence of using Stress Relieving Feature on Reducing the Root Fillet Stress in Spur Gear.

- In *Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Methods, Mathematical Models and Simulation in Science and Engineering* (pp. 141-146).
- [19] Dhavale, A. S., & Utpat, A. (2013). Study of Stress Relief Features at Root of Teeth of Spur Gear. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN, 2248-9622.
 - [20] Liu, P., Wang, Y., Li, J., Lu, C., Quek, K. and Liu, G., 2003. Parametric study of a sprocket system during heat-treatment process. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(1), pp.25-40.
 - [21] Rapoport, E. and Pleshivtseva, Y., 2007. *Optimal Control Of Induction Heating Processes*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis.
 - [22] Barglik, J., Ducki, K., Kukla, D., Mizera, J., Mrówka-Nowotnik, G., Sieniawski, J., & Smalcerz, A. (2018). *Comparison of single and consecutive dual frequency induction surface hardening of gear wheels*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 355, 012015. doi:10.1088/1757-899x/355/1/012015.
 - [23] Rudnev, V. (2008). Induction hardening of gears and critical components, Part 2. *Gear Technology*, 47-53.
 - [24] Rudnev, V.I. (2009). *Single-coil dual-frequency induction hardening of gears*. *Heat Treating Progress*. 9. 9-11.
 - [25] Nemkov, V., & Goldstein, R. (2003). Computer simulation for fundamental study and practical solutions to induction heating problems. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.
 - [26] Sabeeh, H. F., Abdulbaqi, I. M., & Mahdi, S. M. (2018, January). Effect of flux concentrator on the surface hardening process of a steel gear. In *2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)* (pp. 80-85). IEEE.
 - [27] Thipprakmas, S. (2011). *Improving wear resistance of sprocket parts using a fine-blanking process*. *Wear*, 271(9-10), 2396–2401. doi:10.1016/j.wear.2010.12.015.
 - [28] Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2012). *Fundamentals of Machine Component Design* (5th ed.). J. Wiley & Sons.
 - [29] Campbell, J., 1990. *Dibble Sticks, Donkeys, And Diesels*. Manila, Philippines: International Rice Research Institute
 - [30] Ebhota Williams, S., Emmanuel, A., & Peter, O. (2014). Fundamentals of sprocket design and reverse engineering of rear sprocket of a Yamaha CY80 motorcycle. *International Journal of Engineering and Technology*, 4(4), 170-179.
 - [31] Selvi, S. P., Kumar, P. S., & Vishwanathan, N. (2014, December). Design and control of two-inverter dual frequency induction hardening. In *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 1-6). IEEE.
 - [32] Diong, B., Basireddy, S., & Corzine, K. (2003, November). Multilevel converter-based dual-frequency induction heating power supply. In *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No. 03CH37468)* (Vol. 2, pp. 1992-1997). IEEE.

- [33] Barka, N., Ouafi, A. E., Chebak, A., Bocher, P., & Brousseau, J. (2012). Study of induction heating process applied to internal gear using 3D model. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 232, pp. 730-735). Trans Tech Publications Ltd.
- [34] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2019). *Reduction of edge effect using response surface methodology and artificial neural network modeling of a spur gear treated by induction with flux concentrators. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-019-03817-9.
- [35] Hammi, H., Barka, N., & El Ouafi, A. (2015). Effects of induction heating process parameters on hardness profile of 4340 steel bearing shoulder using 2D axisymmetric model. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 4, 41-48.
- [36] Jakubovičová, L., Andrej, G., Peter, K., & Milan, S. (2016). *Optimization of the Induction Heating Process in Order to Achieve Uniform Surface Temperature. Procedia Engineering*, 136, 125–131. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.185 .
- [37] Hammi, H., El Ouafi, A., & Barka, N. (2016). Study of frequency effects on hardness profile of spline shaft heat-treated by induction. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(03), 1.
- [38] Choi, J.-K., Park, K.-S., & Lee, S.-S. (2018). *Predicting the hardening depth of a sprocket by finite element analysis and its experimental validation for an induction hardening process. Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(3), 1235–1241. doi:10.1007/s12206-018-0227-4.
- [39] Barglik, J., Smalcerz, A., & Smagor, A. (2015, October). Induction hardening of small gear wheels made of steel 50CrMo4. In *8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*.
- [40] Barka, N. (2017). *Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction—2D model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4), 1173–1181. doi:10.1007/s00170-017-0586-5.
- [41] Dokos, S. (2017). *Modelling organs, tissues, cells and devices: using Matlab and Comsol multiphysics*. Springer.
- [42] Fleisch, D., 2008. *A Student's Guide To Maxwell's Equations*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [43] Chikazumi, S., & Graham, C. D. (2009). *Physics of Ferromagnetism 2e* (No. 94). Oxford University Press on Demand.
- [44] Monk, P. (2003). *Finite element methods for Maxwell's equations*. Oxford University Press.
- [45] Yuan, J., Kang, J., Rong, Yiming , Sisson, Richard D. (2003). FEM Modeling of Induction Hardening Processes Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(5), 589-596.
- [46] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 9). New York: Wiley.
- [47] Barka, N., El Ouafi, A., Bocher, P., Brousseau, J., & Chebak, A. (2013). Explorative study and prediction of overtempering region of disc heated by

induction process using 2D axisymmetric model and experimental tests. In *Advanced Materials Research* (Vol. 631, pp. 417-423). Trans Tech Publications Ltd.

- [48] Pedersen, S., Hansen, J. and Ambrósio, J., 2004. A Roller Chain Drive Model Including Contact with Guide-Bars. *Multibody System Dynamics*, 12(3), pp.285-301.
- [49] Barka, N., Chebak, A., El Ouafi, A., Jahazi, M., & Menou, A. (2014). A new approach in optimizing the induction heating process using flux concentrators: application to 4340 steel spur gear. *Journal of materials engineering and performance*, 23(9), 3092-3099.
- [50] Bringas, J. E. (2004). Handbook of comparative world steel standards (ASTM DS67B). In *Library of Congress Cataloging*.
- [51] Barka, N., Bocher, P., & Brousseau, J. (2013). Sensitivity study of hardness profile of 4340 specimen heated by induction process using axisymmetric modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9), 2747-2756.

CHAPITRE 2

OBTENTION D'UN CONTOUR UNIFORME DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE AUTOUR DU PROFIL D'UN ÉCHANTILLON DE PIGNON DURCI PAR CHAUFFAGE PAR INDUCTION SÉQUENTIEL LE À DOUBLE FRÉQUENCE

2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE

Cette étude est réalisée pour analyser les différents effets des paramètres mécaniques et thermiques impliqués dans le processus de chauffage par induction électromagnétique en utilisant l'approche séquentielle à double fréquence sur la distribution de température finale par analyse de variance (ANOVA) pour les résultats obtenus à partir des expériences de simulation basées sur les modèles expérimentaux développés par les réseaux orthogonaux de Taguchi dans le but d'étudier la sensibilité du profil trempé du pignon en acier 4340 à la distribution et à la variation de température finale. Les paramètres ont été optimisés en étudiant la variation de température entre les régions du bord et du milieu ainsi que la variation de température entre la pointe et la racine des dents du pignon, en cherchant à réduire l'effet de bord.

Les résultats de la simulation ont été obtenus en couplant le champ électromagnétique et le transfert de chaleur du modèle d'éléments finis à l'aide d'un logiciel tridimensionnel COMSOL Multiphysics et un algorithme a été conçu à l'aide de MATLAB pour gérer un grand nombre de simulations et exporter les données du profil de température. Les résultats obtenus démontrent la force, la qualité et la robustesse du modèle statistique proposé dans la capacité de prédire avec précision le comportement de la distribution et de la variation de la température résultant du processus de trempe par induction. Elle montre également qu'une approche à double fréquence est la solution idéale pour obtenir un contour uniforme de la dureté du profil pour les pièces mécaniques avec des formes géométriques complexes.

Mots clés : Chauffage par induction, pignon, double fréquence séquentielle, étude de sensibilité, FEM, ANOVA, effet de bord.

Le professeur Noureddine Barka et moi avons co-écrit ce deuxième article intitulé « Obtention D'un Contour Uniforme De La Distribution De La Température Autour Du Profil D'un Échantillon De Pignon Durci Par Chauffage Par Induction Séquentiel Le À Double Fréquence ». Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2021 par le *Journal of Advanced Materials Research (AMR)*. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a été de revoir la littérature et de rechercher les dernières découvertes des scientifiques, des chercheurs et des industriels sur la technologie utilisée dans cet article, de développer la méthode, de réaliser des expériences de simulation, de gérer les résultats et de rédiger l'article. Le professeur Noureddine Barka, le deuxième auteur, a présenté l'idée originale. Il a également participé à la recherche des dernières découvertes scientifiques, à l'élaboration de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article.

2.2 OBTAINING A UNIFORM CONTOUR PATTERN OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION AROUND THE PROFILE OF A SPROCKET SAMPLE HARDENED BY SEQUENTIAL DUAL-FREQUENCY INDUCTION HEATING.

2.2.1 Abstract

The purpose of this study is to examine the effects of the various mechanical and thermal parameters involved in the electromagnetic induction heating process using the sequential dual-frequency approach on the final temperature distribution. The sensitivity study of the hardened profile of 4340 steel sprocket to the final temperature distribution and variation was investigated using analysis of variance (ANOVA) for the results obtained from simulation experiments based on experimental models developed by Taguchi orthogonal networks. The parameters were optimized by studying temperature variation between the edge and middle regions and temperature variation between the tip and the root of sprocket teeth, seeking to reduce the edge effect. Simulation results were obtained by coupling electromagnetic field and heat transfer of finite element model using a three-dimensional COMSOL Multiphysics software and an algorithm was designed using MATLAB to handle a large number of simulations and export temperature profile data.

The obtained results demonstrate the strength, quality, and robustness of the proposed statistical model in the ability to accurately predict the behavior of temperature distribution and variation after the induction hardening process, and the use of a dual-frequency approach in induction hardening is the ideal solution able to achieve uniform contour of the profile hardness for mechanical parts with complex geometric shapes.

Key Words: Induction heating, Sprocket, Sequential dual-frequency, Sensitive study, FEM, ANOVA, Edge effect.

2.2.2 Introduction

Induction heating has emerged as a unique and highly intriguing option to hardening gears and other mechanical equipment with complex geometry shapes as a clean, ecologically friendly, energy-saving, and non-contact hardening method [1-3]. They are utilized in the industries of aircraft, automobiles, production lines, and other sectors of global importance [4]. Induction hardening of metals is an alternative to thermal furnaces and thermal chemical processes previously used, particularly since the induction hardening process is extremely quick compared to others [4-5]. The primary characteristics of induction hardening include heating just the regions to be hardened without heating others in the heat treatment process, creating a residual stress condition on the surface, and creating a residual stress distribution below the surface [6-7].

The combination of these techniques and features to improve case depth, as well as the ability to automate the process and control the temperature distribution, greatly broadens the application range of induction hardening in the manufacturing process to improve the mechanical properties of components [8].

Induction hardening has undergone numerous developments and modifications in order to achieve a true contour of case depth for the hardened part, particularly in the hardening of mechanical equipment with complex geometric shapes such as gears and sprockets [4]. Because the distance between the inductor and the part to be treated thermally from the workpiece plays an important and fundamental role in determining the depth of hardness [9]. When the part is farther away from the inductor or a deeper case depth is needed, a lower frequency must be utilized. And when the part is closer to the inductor, a higher frequency should be utilized, or if a shorter case depth is required. This is applicable for hardening gears and sprockets since the tip of the tooth is near to the inductor while the root is distant from it. To harden both ends of the tooth (tip and root) and obtain a contour pattern of the hardness profile, we must use two distinct frequencies. One of them provides a high frequency to the inductor, while the other provides a medium frequency to the inductor [10-11]. In contrast, if the component has a uniform cylindrical shape, obtaining the required state depth is simple with a single-frequency power supply [12].

V. Rudnev explained the heating concepts involved in induction hardening of gears, where he showed through his study that the induction hardening process includes a number of process concepts that depend on the gear geometry and the required case depth for the hardened profile, and he explained through his study that one of the concepts of dual-frequency (SDFC and PDFC) must be used in induction hardening of large-tooth gears [13].

R. Przyucki and A. Smalcerz studied the impact of the distance between the inductor and the gear and the height of the inductor on the temperature distribution in a numerical simulation of applying the PDFC to the teeth of a gear wheel without specifying the kind of gear employed in his research. Explaining how difficult it was to achieve a uniform distribution of temperature around the hardened profile during the induction hardening process, and demonstrating that the use of the PDFC during the induction hardening process improves the ability to control the temperature and its distribution. However, this research was insufficient and unclear to visualize the benefits of utilizing the PDFC, particularly since the time spent applying each frequency was not stated, and the current while altering the distance was not established to observe the real impact on the temperature distribution [14].

The effects of induction heating parameters such as frequency, time heating, applied current, and geometrical variables on final temperature distribution and case depth of work-pieces were investigated by Hammi and Barka [15-16] and Khalifa et al. [17].

Barka was successful in applying the sequential dual-frequency to the spur gear teeth, demonstrating via his research that adopting this method to hardness increases the temperature distribution and case depth around the stiffness profile of the gears. As a result, the hardness profile's semi-regular contour pattern around the gear teeth is obtained. However, this model was unable to predict the edge effect, and the distance between the flux concentrators was not included in the research, which has a demonstrable impact on decreasing the edge effect and reducing temperature variation between the tip and root of the gear [5].

Induction heating machine components may now be fitted and constructed to harden a part locally by coil utilizing medium and/or high-frequency generators, thanks to recent advances in technology and research [18]. Scan hardening is the most often used method for hardening gears,

in which during the hardening process, the inductor or workpiece, or both, may move linearly relative to each other. In this study the sequential dual-frequency approach is applied in the inductive scanning hardening process. It is one of the techniques of the pulsing dual-frequency concept (PDFC) [13]. In this approach, both medium and high-frequency ranges are applied to the same workpiece consecutively, one after the other. This necessitates the use of one medium-frequency and one high-frequency generator, both of which supply the same inductor. The medium frequency circuit is used to austenitize the tooth root. The workpiece is subsequently heated to austenitize the tooth tips using the high-frequency circuit. After then, the gear is rapidly quenched. The edge effect arising from an irregularity in the distribution of current in the workpiece has a significant undesirable effect in induction heating applications on geometric shapes, as this effect is primarily responsible for the irregularity of the temperature distribution along the workpiece profile [8].

Indeed, the purpose of this research was to optimize the parameters of the induction hardening process in order to reduce the edge effect by reducing the temperature difference between the tip and the root in both the middle and the edge of the sprocket tooth and at the same time minimizing the temperature difference between the middle and the edge at both the tip and the root, in order to achieve the best contour pattern for the hardness profile. This pattern eliminates the effect of the holes, cutouts, and hup present in the sprocket design [4, 19], resulting in the creation of a better condition of the residual stress distribution [1, 20].

The main objective of this work was to study the sensitivity of the hardness profile to the final temperature distribution through different process parameters based on analysis of variance (ANOVA) on data extracted from simulations and then find the relationship between them in order to obtain a complete and comprehensive concept of the process. Statistical tools were also utilized to investigate the impact of each parameter on the temperature difference between the tip and the root of the tooth, as well as the temperature difference between the edge and the middle at the tip and the root of the tooth. ANOVA was used to construct prediction models based on the data collected from the simulations to predict the temperature distribution and temperature difference at the completion of heating.

The simulation efforts are carried out using COMSOL® Multiphysics software by using the FEM simulation of a sprocket specimen 3D Model based on the coupling of electromagnetism and heat transfer studies capable of describing with sufficient accuracy the temperature distribution around the profile after induction heat treatment.

2.2.3 Theoretical Background

The induction heating process is based on the electromagnetic skin effect property, which is the generation of heat in the workpiece through the use of induced eddy currents. This is caused by the AC magnetic field applied to the heating coil, and it led to the formation of a depth in the workpiece known as the skin penetration depth (δ), which is related to the frequency of the AC by the following equation [21]:

$$\delta = \sqrt{\rho/\mu_r f} \quad (1)$$

Where f the frequency of alternating current of the coil, ρ is the electrical resistivity and μ_r is the relative magnetic permeability of the workpiece. So, the induction heating process consists of a set of very complex electromagnetic and thermal problems that are solved by means of interrelated Maxwell's equations and Fourier equations to describe the temperature distribution in space and time within the workpiece.

Based on the employment of magnetic vector potential A , we can greatly simplify the complex electromagnetic equations [21]. The governing equations can be expressed in terms of the magnetic vector potential A and the electric scalar potential ϕ as in the following equations [22]:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J_o - \sigma_c \left[\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \sigma_c \left[\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right] = 0 \quad (3)$$

Where μ , J_o , and σ_c are expressing the magnetic permeability, the induced current density, and the electrical conductivity respectively. When we treating AC problems the terms including the partial time derivative $\frac{\partial}{\partial t}$ can be replaced with the complex variable expression $j\omega$, where ω describe the angular frequency of the current. The uniqueness of solutions for **Equation (2)** can be guaranteed by substituting Coulomb gauge $\nabla \cdot A = 0$ [21]. Taking them into consideration in **Equations (2)** and **(3)** leads to the following general equations explaining the electromagnetic behavior in the induction heating process:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = -J_o + \sigma_c (j\omega A + \nabla \phi) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \sigma_c (j\omega A + \nabla \phi) = 0 \quad (5)$$

Through **Equations (4)** and **(5)**, eddy current density J_e is expressed in terms of the magnetic vector potential A and the electric scalar potential ϕ given by the electromagnetic analysis as shown in the following equation [23]:

$$J_e = \sigma_c (j\omega A + \nabla \phi) \quad (6)$$

By using the obtained eddy current density from **Equation (6)**, the heat generated inside the workpiece due to Joule-Lenz heating ($Q_{\text{induction}}$) is defined by the magnetic vector potential A as follows [6]:

$$\dot{Q}_{\text{induction}} = \int_v |J_e|^2 \sigma^{-1} \cdot dv \quad (7)$$

The heat transfer mechanism inside the workpiece is governed by the transient (time-dependent) heat transfer equation with phase changing, where heat conduction transfer is expressed using the Fourier- Kirchhoff equation, which is described by the following [24-25]:

$$\gamma C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \nabla^2 T + \dot{Q}_{\text{induction}} \quad (8)$$

Where γ , C_p , and k are represents respectively the material density, specific heat, and thermal conductivity of the workpiece.

2.2.4 Simulation Model

The induction hardening method is used to harden a sprocket sample, also known as a roller chain drive, in this research. Which is a positive mechanical drive with a flexible link (chain or synchronous belts) that falls under the term transmission [26-27]. The sprocket's geometry and design vary from that of the gear or pulley in that it is designed with teeth that intertwine with a chain or synchronous belt, providing it the advantage of non-slip or creep in the sprocket, similar to the soft pulley.

The sprocket differs from a gear in that the mutual position of the driving wheel and the driven wheel is indirect, which means that they are connected with each other through an intermediate link such as a chain drive, whereas the gears are intertwined without an intermediate, and this gives the sprocket the advantage of providing high torque in low-speed conditions. [28-29]. Thanks to these and other characteristics, sprockets are widely used in the transportation industry, the manufacture of industrial and agricultural machinery, the construction of cranes, and the manufacture of oil-well drilling rigs [30-31]. The sprocket tooth geometry was more complicated than the gear tooth geometry because the sprocket was designed to mesh with the chain and the distance between the tip and the root of the sprocket was large enough to fit the chain's inner link plates. This made the hardness profile's uniform contouring pattern more difficult to achieve.

2.2.4.1 Geometry

For this FEM simulation, the developed model corresponded to a sprocket specimen consisting of 24 teeth, with an outside diameter of 104 mm, a 16 mm inner diameter, and a 7 mm thickness. The inductor was designed as a solid copper section with an inner diameter of 110 mm, an outer diameter of 140 mm, and a thickness of 7 mm. Hence, the radial gap between the main tooth and the coil is fixed at 3.18 mm. The model was created in an environment (Air), accounting for its dielectric permeability and vacuum permittivity. Two flux concentrators with identical geometry from the main tooth have been added to the model, thanks to the efforts of Barka et al. [32], which help reduce the edge effect by focusing electromagnetic waves on specific areas of the tooth by providing a better path for magnetic flux lines and controlling the penetration of induced currents. The two flux concentrators were reduced in half by taking advantage of the rotational and planar symmetrical shape of the sprocket and the coil, and both the coil and the main tooth were reduced to a quarter, taking into consideration a single flux concentrator. **Figure 2.2** depicts the model's final geometry, whereas **Figure 2.1** shows the four ends of the sprocket tooth head: tip edge (TE), tip middle (TM), root edge (RE), and root middle (RM), which will be taken into account in study of temperature distribution and case depth in this work.

2.2.4.2 Material

It is worth mentioning that the sprocket sample utilized in the FEM simulation is composed of an isotropic and homogeneous alloy AISI 4340 steel [33], the chemical composition of which is given in Table 2.1 [3].

Table 2.1 Weight % of elements for alloy AISI 4340 steel.

Fe	Ni	Cr	Mn	C	Mo	Si	S	P
95.195-96.33	1.65-2	0.7-0.9	0.6-0.8	0.37-0.43	0.2-0.3	0.15-0.3	0.04	0.035

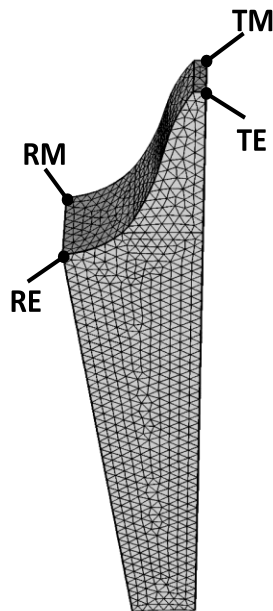


Figure 2.1 The four ends of the main tooth head.

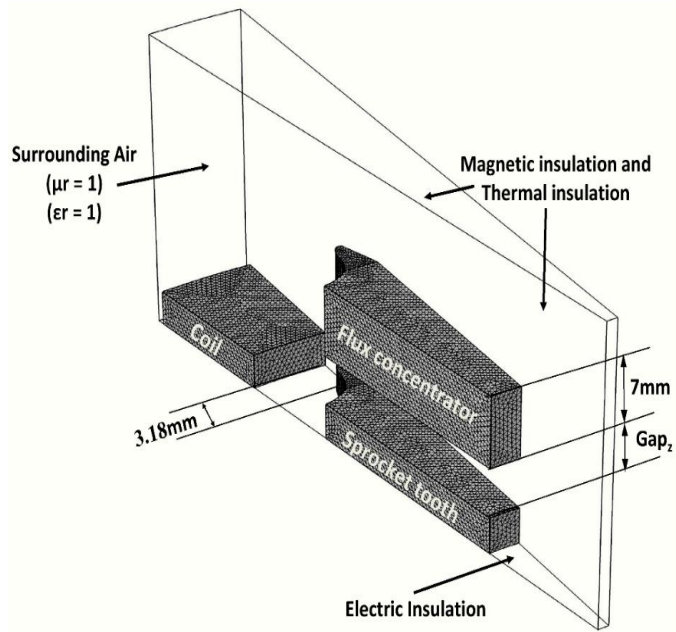


Figure 2.2 The final design of the model with the final mesh.

2.2.4.3 Process Parameter Selection

The efficiency of temperature distribution in the workpiece and the heating rate induced by induction heating are depending on several factors, including mechanical part characteristics (material and geometry), inductor design, and heating system parameters (power supply capacity, frequency, induced current density, heating time, and etc.). Each factor and parameter have its own degree of influence on the final temperature distribution and contour hardness profile [8].

This section describes how to regulate and adjust critical parameters of the induction heating process using a sequential dual-frequency approach. This includes adjusting the heating time (t_c), the imposed current density (J_o), and the amount of gap between the main tooth and the flux concentrators (Gap_z) to achieve the required minimum temperature distribution. Because changing the geometric parameters while switching between the two frequencies consecutively is extremely difficult mechanically, a single distance is adjusted for both frequencies for the gap between the main part and the flux concentrators.

To adequately distribute heat according to the contour of the teeth, the preheating is usually performed at medium frequency (MF) and the final heating is usually performed at high frequency (HF) in the sequential heating approach. Several model simulations were conducted to ensure true-contour hardening of the tooth without through-hardening and affecting the core of the sprocket tooth. In this simulation, the imposed current density was set to 3.79 at a heating time of 0.3 seconds, so that the preheating temperature is sufficient to bring the final temperature to the desired austenitic temperature at the tip and root of the tooth upon final heating by HF, at which the current density was set to 16.89 at a heating time of 0.2 seconds. With these settings, we achieve a temperature distribution of (850-870) °C at both the top and root of the tooth, which is the lowest temperature that causes the metallography of AISI 4340 steel to change to the austenite phase.

The axial gap between the main tooth and the flux concentrators (Gap_z) required a study, as shown in **Figure 2.3**, to determine the most appropriate distance to achieve the lowest temperature difference between the four ends of the main tooth shown in **Figure 2.1**, because, according to the model's simulation results, the axial gap in the MF greatly affects the temperature difference between the tip and the root. While at the high-frequency HF it greatly affects the temperature difference between the edge and the middle at both the tip and the root of the tooth. Based on **Figure 2.3**, the axial gap has been adjusted to 0.6 mm. This is the distance at which the temperature difference between the tip and the root is the lowest, at the same time, the temperature difference between the edge and the middle of the tooth is low. As a result, all parameter values used in this study are as shown in **Table 2.2**.

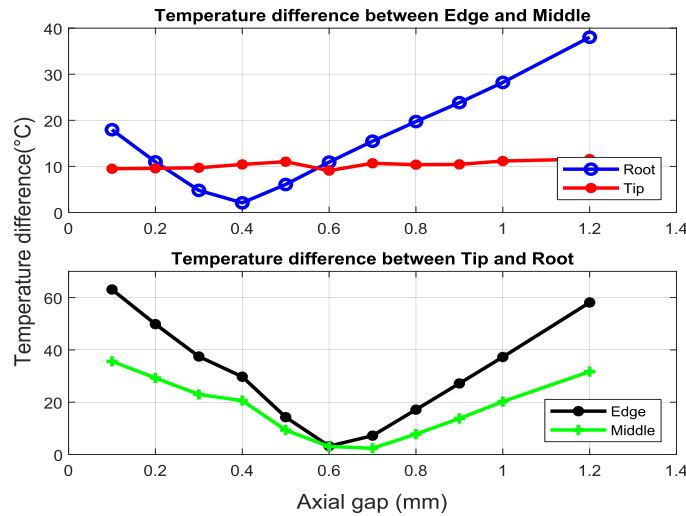


Figure 2.3 Study of flux concentrators gap (Axial gap).

Table 2.2 *Simulation Parameters of induction hardening Process.*

Sequence	Frequency (kHz)	Heating time (s)	Imposed current density, A/m ²	Axial gap(mm)
MF Heating	10	0.3	3.75×10^{10}	0.6
HF Heating	200	0.2	16.9×10^{10}	

2.2.4.4 Mesh Study

Because the COMSOL software is based on the FEM, a mesh convergence study was required to achieve the highest accuracy while also reducing simulation time because the number of simulations in this study is extremely large, particularly because it is a 3D model. FEM meshes use tetrahedral elements. **Figure 2.4** depicts temperature monitoring with mesh-size at the four ends of the tooth head using the same settings as in **Table 2.2** for each investigation. The size of the mesh was set at 0.5 mm for this study based on the study presented in **Figure 2.3** since temperatures started to stabilize at the four ends of the tooth head at that size. **Figure 2.5** shows the sprocket heating scenario, in which the temperature increases with time at both the MF and HF of the four ends of the tooth. The tooth root is preheated to approximately 700 °C, and the tooth tip is preheated to about 300 °C before the HF is applied to bring the final temperature to the austenitic degree at both the tip and the root of the tooth. **Figure 2.6** illustrates the temperature distribution around the tooth's hardness profile after the initial mesh and process parameter selection.

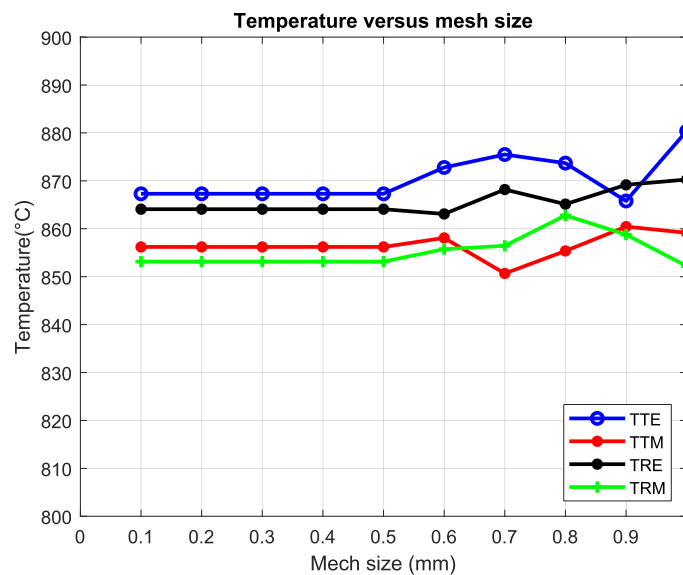


Figure 2.4 *Temperature degree according to the mesh size.*

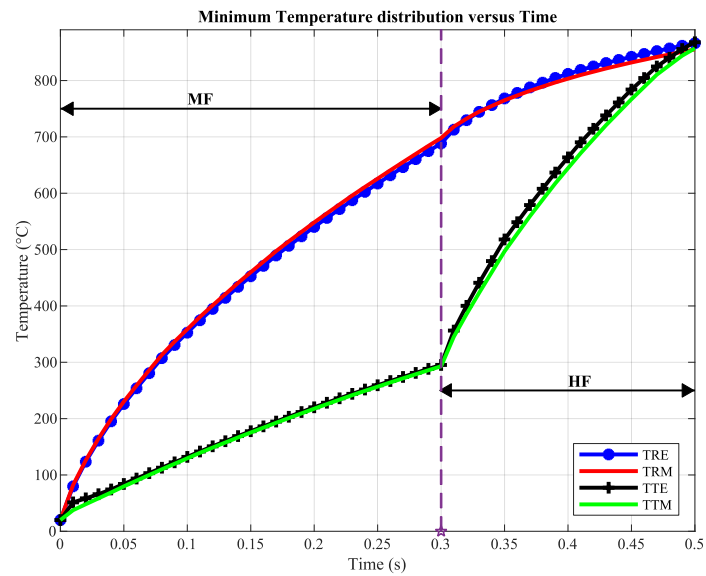


Figure 2.5 Temperature evolution over time during HF and MF.

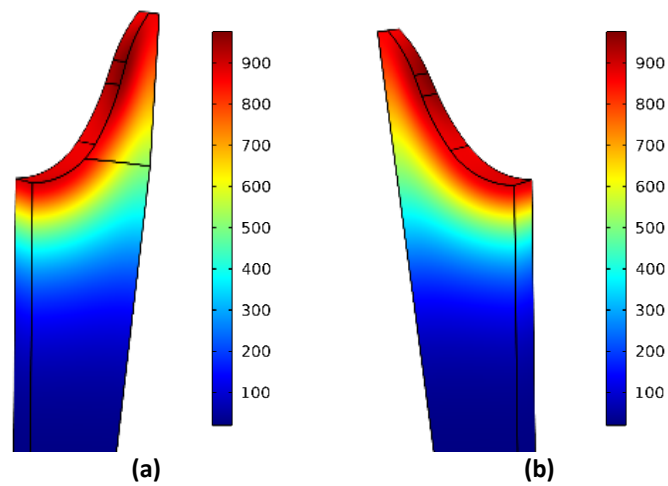


Figure 2.6 Temperature (°C) distribution at the end of heating. a Edge. b Middle.

2.2.4.5 Experimental Design

The Taguchi smart method made the design of experiment (DOE) simpler and more appealing to industrialists [34], and it is now extensively and effectively used to conduct experimental design for many studies that are comparable to this one in terms of process parameters [5, 35]. Taguchi's method has proved effective in achieving excellent quality at a low cost and in a short period of time [36]. The Taguchi method was used to design experiments, which were carried out using an L_{27} orthogonal array of five columns and 27 rows, resulting in 27 experiments. This design was chosen based on five induction heating parameters, each with three levels, as shown in Table 2.3, where these levels were set to ensure the lowest temperature difference between the four ends of the sprocket tooth head, while keeping the temperature within the limits of the minimum temperature distribution that ensures transformation metallurgy of alloy AISI 4340 to austenite. Statistical Minitab v.18 software was used to apply the Taguchi method to the experimental data.

Table 2.3 *Input Parameters of Induction Hardening Process and Their Level.*

Parameters	Unit	Code	Level 1	Level 2	Level 3
MF current density	($\times 10^{10}$ A/m ²)	A	3.785	3.885	3.985
HF current density	($\times 10^{10}$ (A/m ²))	B	16.89	16.99	17.09
MF heating time	s	C	0.30	0.31	0.32
HF heating time	s	D	0.20	0.23	0.26
Flux Concentrator gap	mm	E	0.60	0.63	0.66

2.2.5 Results and Discussion

The primary objective of this study is to determine the uniform contouring pattern of the hardness profile. As a result, temperature was monitored and recorded at the four ends of the main sprocket tooth head illustrated in Figure 2.1 in all numerical experiments. Figure 2.7 shows a flowchart that summarizes the procedures used to carry out this study. The numerical simulation results were statistically analyzed using the ANOVA technique, which is a statistical method based on the variance between experimental group means that uses a set of statistical tools to evaluate the contribution of each parameter to the process and determine its effect on the final temperature of the hardened profile [37].

2.2.5.1 Sensitivity Study of Temperature Profile

2.2.5.1.1 Contribution of Parameter on Temperature

The ANOVA study provides a path to understanding the effect size and contribution of each multi-physical parameter, which is known as a sensitivity study according to each of the geometry parameters and machine parameters. The ANOVA analysis was performed in stepwise mode, which automatically eliminates non-significant terms in order to reduce errors and computation time. **Table 2.4** illustrates the contribution factor percentage for each parameter on the temperature at the four ends of the tooth head after performing statistical analysis of simulation results. According to the results in **Table 2.4**, the error is very small and does not exceed 2% of the variation in these final temperatures, and it is also clearly shown that the HF heating time is the parameter that has the most important effect on the temperature at the tip of the tooth, as its contribution percentage varies between 97.31 and 97.83 %, while the remaining parameters don't have a significant effect on the temperature at the tip of the tooth. When it comes to temperatures at the root, it turns out that the medium frequency current density has a significant influence on both the edge and the middle, with a contribution of 49.79 to 51.93 %. The heating time of MF and HF has a considerable impact on the final temperatures at the root, contributing 20 to 24 %. The axial gap between the main tooth and the flux concentrators has little impact on the final temperatures at the root.

2.2.5.1.2 Parameter Effect on Temperature

The ANOVA statistical analysis was also utilized to generate the average effect graph of parameters shown in **Figure 2.8**. These findings explain the importance and contribution of each process parameter to the temperatures at the four ends of the tooth head, as well as the nature of the relationship between them.

The average effect graph shows the biggest and main influence of the HF heating time at the tip of the tooth, where the temperature increases at both the edge and the middle as the heating time increases. The remaining process parameters are represented by approximately horizontal lines in the graph. This implies that changing these parameters has no effect on the temperature at the tip of the tooth.

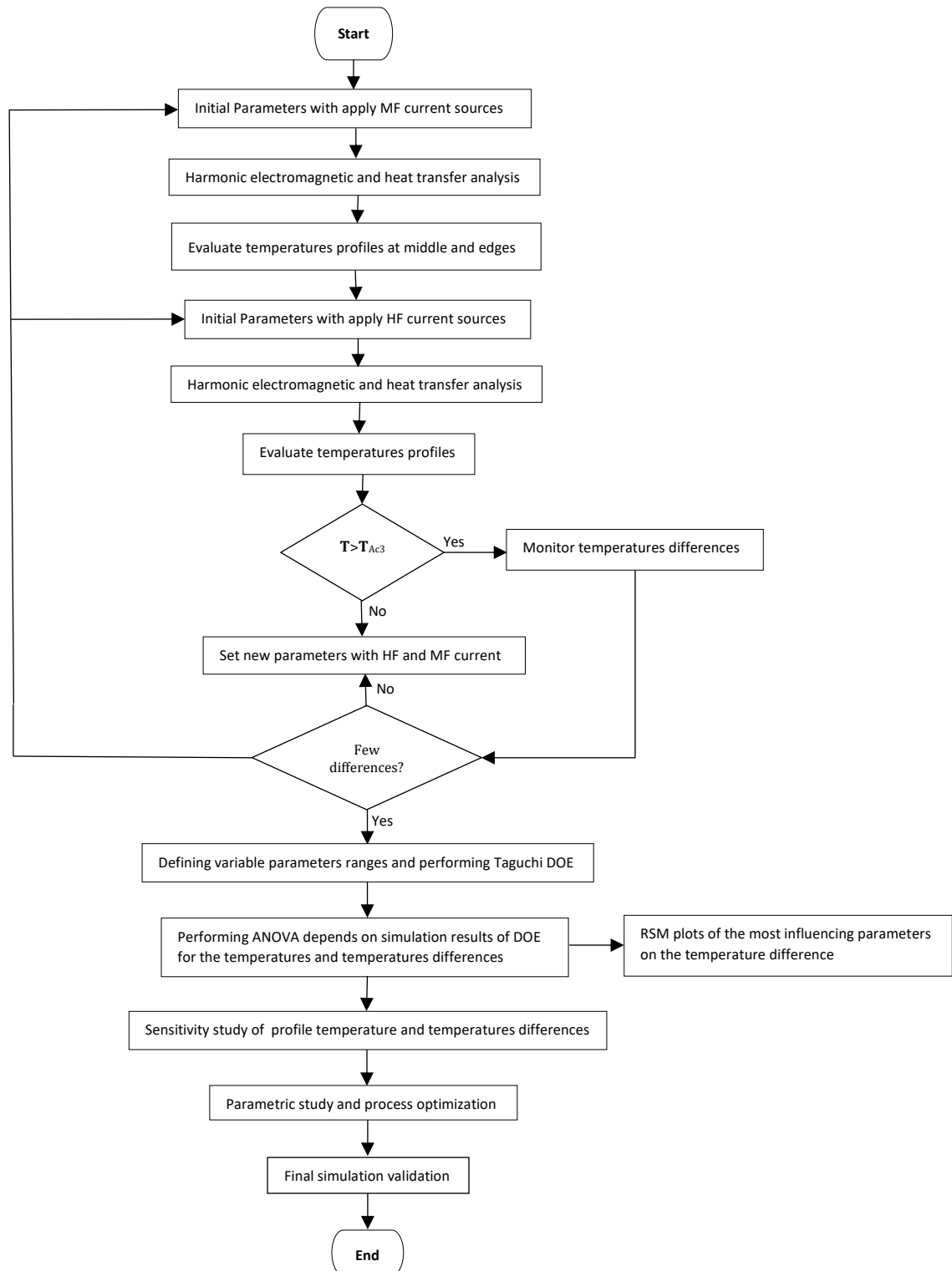


Figure 2.7 Flowchart of the FEM study procedure.

The graph indicates that the MF current density, HF heating time, and MF heating time have the greatest impact on the temperature at the root of the tooth; it is evident that these effects follow the same trends. Overall, the temperature at the root's edge and middle increases as the MF current density increases, as do the HF and MF heating times.

Table 2.4 *The ANOVA results for temperature profile model.*

	<i>percent contributions of process parameters</i>									
	A%	B%	C%	D%	E%	Error%	R ² %	R ² _{adj} %	R ² _{pred} %	S
TTE	0.06	1.17	0.42	97.31	0.04	0.06	99.94	99.91	99.84	1.05
TTM	0.23	1.12	0.48	97.83	0.02	0.06	99.94	99.91	99.84	0.93
TRE	49.79	1.82	20.78	24.09	1.95	0.41	99.59	99.44	99.19	1.65
TRM	51.93	2.00	22.03	21.97	0.63	1.58	99.61	99.47	99.23	1.59

2.2.5.1.3 Predicted Temperature Model

The ANOVA tables also show the adequacy measures R^2 , R^2_{adj} , R^2_{pred} , and S for each response as shown in [Table 2.4](#). The R^2 value, which varies from 99.61 to 99.94 %, is the percentage of variation in the response that the model predicts, and it is used to evaluate how well the model fits the data. The higher the R^2 value, the better the model fits the data and it's always between 0% and 100%. Statistical analyses of these results show that the model is extremely well fitted to the data. Adjusted R^2 (R^2_{adj}), which ranges from 99.44 to 99.91 %, is the percentage of the variation in the response explained by the model, adjusted for the number of predictors in the model relative to the number of observations, and it is used to compare models with different numbers of predictors. The adjusted R^2 value incorporates the number of predictors in the model to help us choose the correct model. The predicted R^2 (R^2_{pred}), which ranged from 99.19 to 99.84% indicated how well our model predicts the response for new observations. The S value, which varies from 0.93 to 1.65, assisted us in determining how well the model describes the response, demonstrating that the lower the value of S, the better the model describes the response.

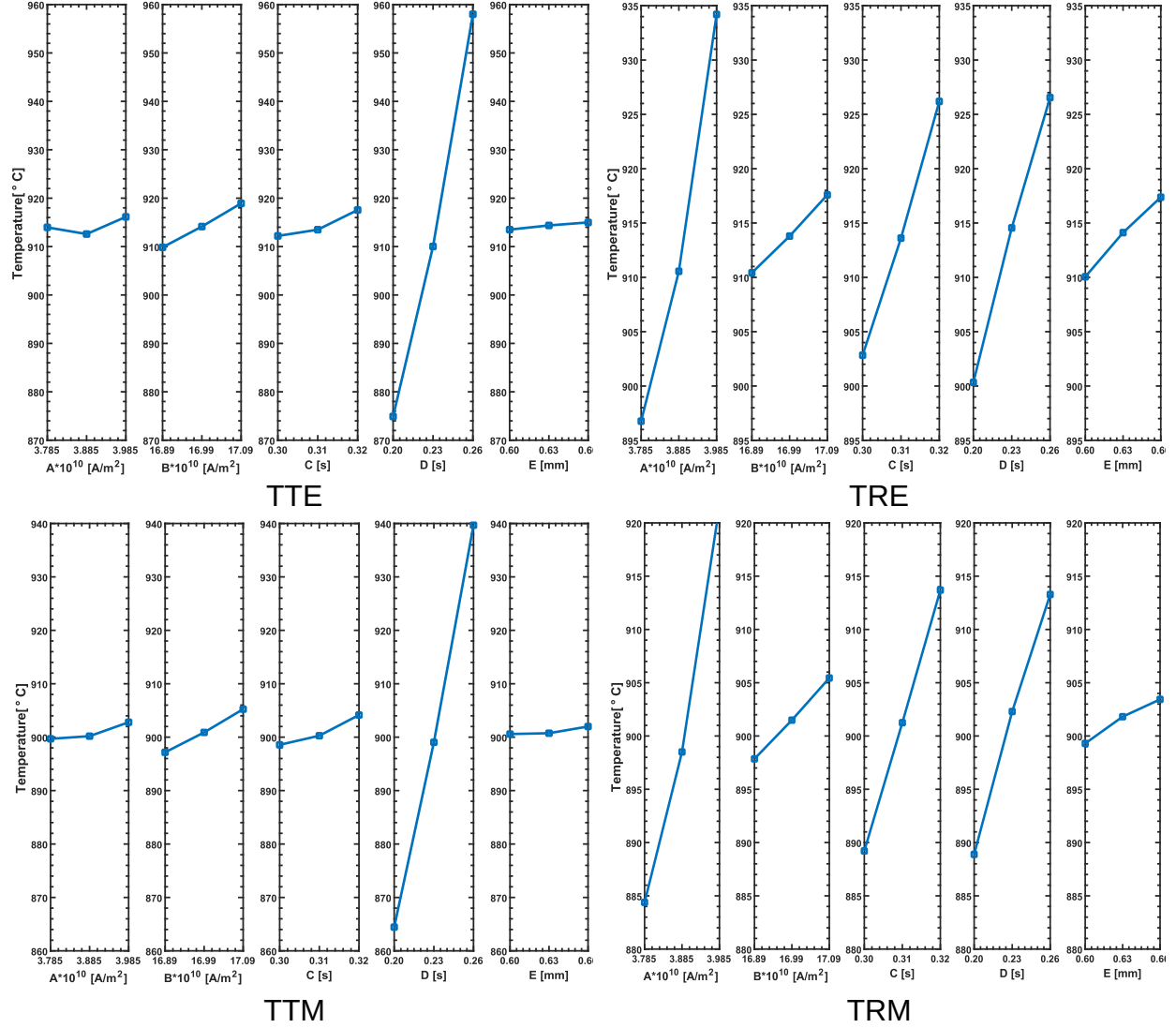


Figure 2.8 Average Effect of parameters process on temperature.

One of the aims of this study is to investigate a precision model capable of accurately predicting the temperature at the four ends of the tooth head based on process parameters. The predicted mathematical models are one of the very important and desirable things that the ANOVA statistical study provides, as in this study, the ANOVA provides the predicted mathematical relationship between the temperatures at the four ends of the tooth head in the function with all the parameters of the hardening process represented by **Equations 9, 10, 11, and 12**.

$$\begin{aligned} \text{TTE} = & 5216 - 1674 \times A + 45.70 \times B - 11079 \times C - 2480 \times D - 200.4 \times E + 216.8 \times A^2 \\ & + 18311 \times C^2 + 7059 \times D^2 + 986 \times D \times E \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{TTM} = & 3047 - 888 \times A + 31.8 \times B - 245 \times C - 19 \times D - 1920 \times E + 116.4 \times A^2 \\ & + 425 \times C^2 + 1217 \times D^2 + 110.8 \times B \times E + 193 \times D \times E \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{TRE} = & 6287 - 3581 \times A + 35.71 \times B + 1206.2 \times C + 959 \times D + 123.2 \times E \\ & + 484.9 \times A^2 - 1143 \times D^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{TRM} = & 5654 - 3258 \times A + 36.72 \times B + 1218.8 \times C + 1030 \times D + 68.6 \times E \\ & + 443.3 \times A^2 - 1357 \times D^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Figure 2.9 presents the scatter plot of predicted vs simulated temperatures at each of the four ends of the tooth head. The scatter plot shows that for each simulated temperature value, the predicted value is on the diagonal line, owing to the low value of the residual errors, and thus the predicted and simulated curves are nearly identical, which explains the good agreement between the predicted and simulated values. The linear fit criteria show that the ANOVA prediction equations may give simulation results a high and acceptable degree of accuracy.

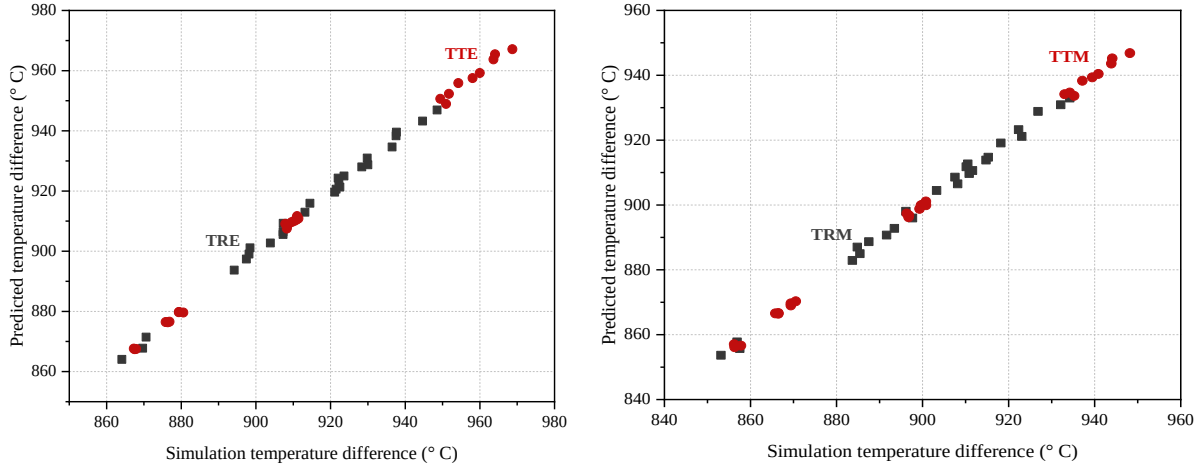


Figure 2.9 Simulated temperatures versus predicted temperature at middle and edges.

2.2.5.2 Sensitivity Study of Temperature Difference

2.2.5.2.1 Contribution of Parameter on Temperature Difference

The primary objective of this study is to find the lowest temperature difference between the tip and the root in both the middle and the edge of the sprocket tooth, while also minimizing the temperature difference between the middle and the edge at both the tip and the root, in order to achieve the best contour pattern for distributing temperature around the hardened profile and thus reduce the electromagnetic edge effect.

To investigate the sensitivity of the contour pattern for temperature distribution according to the parameters of the inductive process, a statistical ANOVA study was performed on the temperature difference based on previously simulated data.

Table 2.5 shows the ANOVA results, which show the contribution percentage of each process parameter to the temperature difference, as it is clear that the temperature difference between the tip and root of the tooth is primarily affected by the MF heating time, which affects 48.91 % on the temperature difference between the tip edge and the root edge, and 51.26 % on the temperature difference between the tip middle and the root middle. Furthermore, the MF current density is the parameter with the greatest effect on the temperature difference between the tip and the root, contributing between 19.34 % and 22.38 % to the temperature difference between the edges and the middle of both the tip and the root respectively.

The remaining process parameters of HF current density, HF heating time, and the axial gap, which have a very small contribution to the temperature difference between the tip and the root and therefore has little impact on the temperature difference between the tip and the root.

On the other hand, the temperature difference between the edge and the middle of both the tip and the root is affected differently by each parameter. The temperature difference between the tip's edge and its middle is mostly affected by the HF heating time, which accounts for 75.24 % of the difference. In terms of the other parameters, their contribution is insignificant and has no effect on the temperature difference. While the temperature difference between the edge of the root and its middle is greatly influenced by the axial gap with a contribution of 75.95%, and it is adequately affected by the heating time of the high frequency by 18.98%. The other factors, as indicated in the ANOVA table, have no discernible impact on the temperature difference. The results of the analysis indicate that the error contribution in the model is extremely tiny, which represents less than 1%.

Table 2.5 *The ANOVA results for temperature difference model.*

	<i>percent contributions of process parameters</i>						R ² %	R ² _{adj} %	R ² _{pred} %	S
	A%	B%	C%	D%	E%	Error%				
TTE-TRE	19.34	5.73	48.91	1.95	0.01	0.80	99.20	98.40	95.86	1.83
TTM-TRM	22.38	6.95	51.26	0.13	0.01	0.06	99.26	98.63	97.25	1.54
TTE-TTM	1.79	1.39	0.05	75.24	0.21	0.41	98.88	98.29	97.23	0.50
TRE-TRM	0.04	0.29	0.45	18.98	75.95	0.04	99.96	99.91	99.73	0.05

2.2.5.2.2 Parameter Effect on Temperature Difference

The average effect graph in **Figure 2.10** shows how parameters affect temperature differences at different degrees. These results indicate how different parameters contribute to the temperature difference between the tip and the root, as well as the temperature difference between the edge and the middle of both the tip and the root, and also the nature of their relationship.

As shown, the MF heating time has the most impact on the temperature difference between the tip and the root, with the difference increasing in a non-linear relationship as the MF heating time increases. The temperature difference between the tip and the root is affected by the MF current density, since an increase in the MF current density leads to an increase in the temperature difference.

The temperature difference between the edge and the middle of the tooth tip is highly influenced by the HF heating time, where at low heating time, the temperature difference is small, and the

temperature difference rises when the HF heating time increases. The axial gap between the tooth and the flux concentrators, which has a positive relationship, is the primary factor influencing the temperature difference between the edge and the middle of the tooth root. The temperature difference decreases as this distance decreases. The temperature difference between the edge and the middle of the root is also influenced by the HF heating time.

2.2.5.2.3 Predicted Temperature Difference Model

As indicated in ANOVA [Table 2.5](#), each of the R^2 , R^2_{adj} , R^2_{pred} and S adequacy measures for all models are remarkably high. This demonstrates the strength of the relationship between the simulation data and the predicted data, where the R^2 percentage ranges between 98.88 to 99.96%, which proves a strong correlation between the simulation results and the predicted results. The percentage of R^2_{adj} ranges between 98.29 to 99.91%, which shows that the models presented by ANOVA are the most correct and accurate models, for R^2_{pred} , which ranges between 95.86 to 99.73%, proves the extent of the model's strength to predict responses for new parameters. S-values ranging from 0.05 to 1.83 showed that the models describe responses with high quality. **Equations 13,14,15 and 16** express the mathematical models for the temperature difference extracted from the ANOVA statistical study, which can be used to predict the temperature difference between the four ends of the tooth head of sprocket specimen.

$$\begin{aligned} TTE - TRE = & 119324 - 1599 \times A - 14092 \times B + 32957 \times C - 4454 \times D - 5655 \times E \\ & + 169.6 \times A^2 + 415.9 \times B^2 - 57939 \times C^2 + 12822 \times D^2 + 1499 \times E^2 \\ & + 567 \times A \times E + 6633 \times C \times E - 2163 \times D \times E \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} TTM - TRM = & 100184 - 134.1 \times A - 12350 \times B + 39910 \times C - 3839 \times D \\ & - 4494 \times E + 364.7 \times B^2 - 67283 \times C^2 + 9422 \times D^2 + 1531 \times E^2 \\ & + 332 \times A \times E + 4664 \times C \times E - 756 \times D \times E \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} TTE - TTM = & 2415 - 786 \times A + 5.44 \times B - 4753 \times C - 1842 \times D - 96.5 \times E \\ & + 100.3 \times A^2 + 7683 \times C^2 + 3678 \times D^2 + 450 \times D \times E \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} TRE - TRM = & 9274 - 339.6 \times A - 960.8 \times B - 2265 \times C - 167.5 \times D - 253.9 \times E \\ & + 41.61 \times A^2 + 28.11 \times B^2 + 3461 \times C^2 + 214.2 \times D^2 + 25.28 \times A \times E \\ & + 7.22 \times B \times E + 169.4 \times C \times E + 152.8 \times D \times E \end{aligned} \quad (16)$$

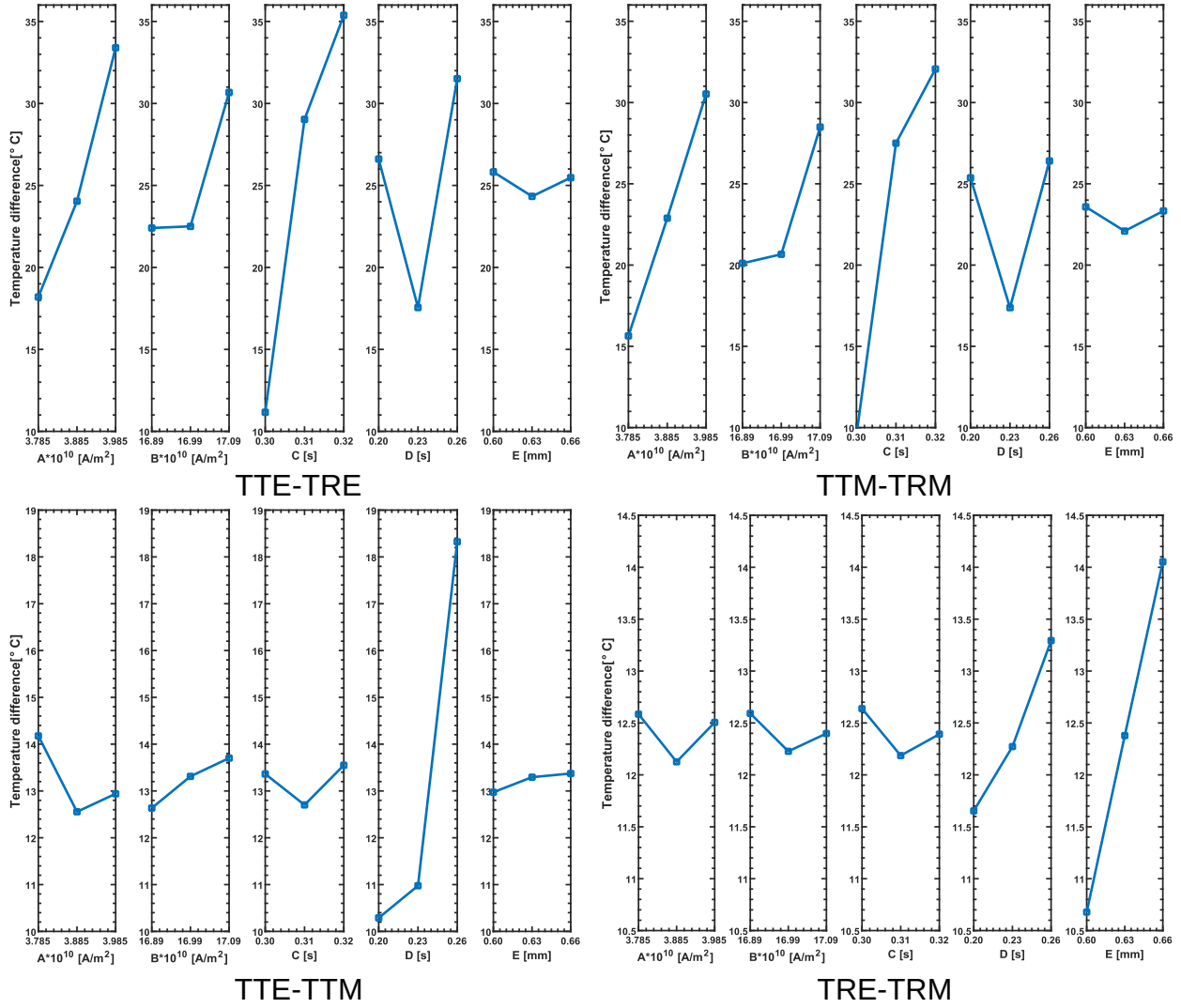


Figure 2.10 Average Effect of parameters process on temperature difference.

Figure 2.11 shows a scatter plot of simulation temperature difference data vs. predicted temperature difference data fitted by ANOVA analysis. This demonstrates how precise and high-quality the temperature difference prediction equations are.

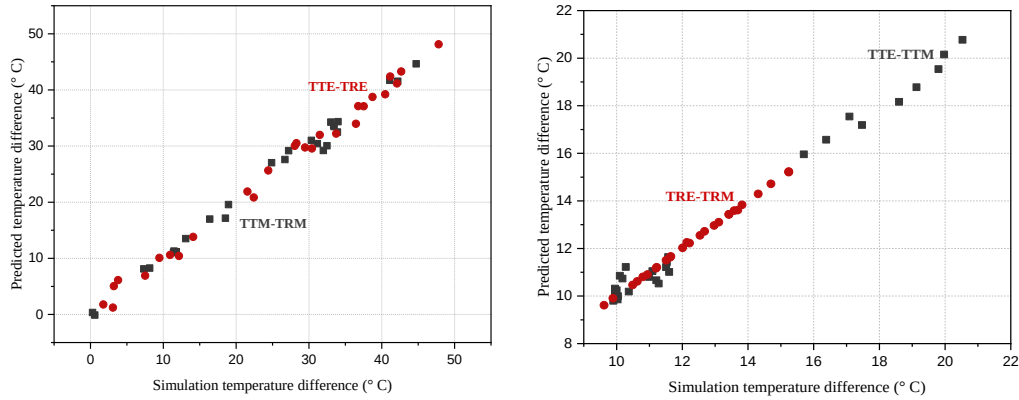


Figure 2.11 *Simulated versus predicted temperature difference.*

2.2.5.2.4 RSM of Temperature Difference Using ANOVA

ANOVA analysis shows the interaction between various input parameters and the objective function using RSM (response surface methodology). The parameters that have the most significant influence on the temperature difference between the tip and the root differ from the parameters that have the most significant influence on the difference between the edge and the middle at the tip and root of the tooth, according to the previous results of the ANOVA statistical study. The response surface to the influence of the most important parameters on the temperature difference between the tip and the root, as well as the temperature difference between the edge and the middle at both the tip and the root, is shown in [Figure 2.12](#).

The graphs **a** and **b** illustrate the impact of the two parameters, MF current density and MF heating time, on the temperature difference between the tip and the root at both the middle and the edge, while keeping the HF heating time, HF current density, and axial gap at typical values. According to the graphs, increasing both the MF current density and the MF heating time increases the temperature difference, which increases the edge effect.

The graphs **c** and **d**, on the other hand, showed the effect of the two parameters, HF heating time and axial gap on the temperature difference between the edge and middle of the tip and the root of the tooth, as well as the suspension of the MF heating time, MF current density, and HF current density at their typical values. The temperature difference between the edge and middle of the tip and the root increased as the heating time increased, whereas the temperature difference between the edge and middle of the tooth root only increased as the axial gap increased; however, the axial gap has no effect on the temperature difference between the edge and middle of the tooth tip.

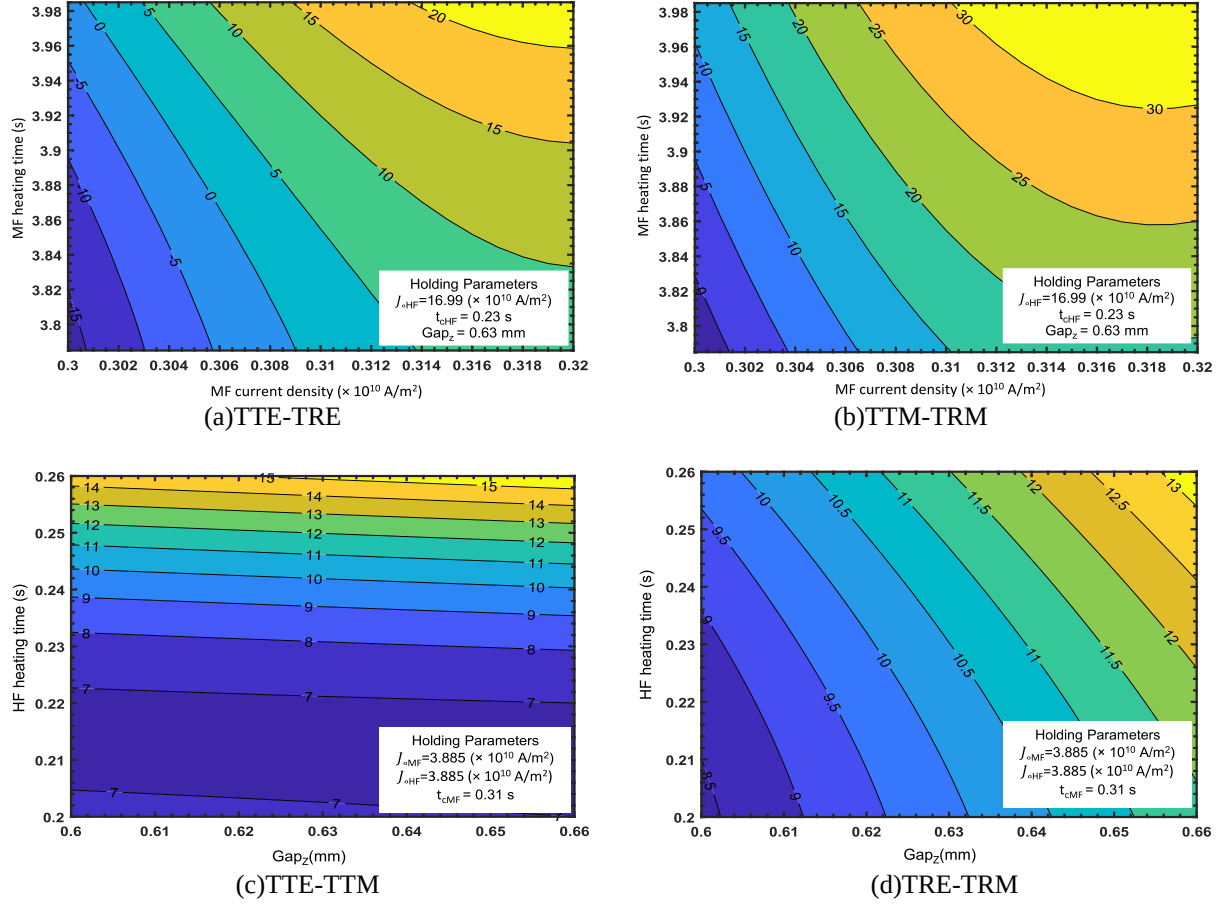


Figure 2.12 RSM of temperature difference based on ANOVA analysis.

2.2.5.3 Simulation Validation of Temperature Difference ANOVA Model

Following the previous statistical analysis results, which demonstrated the strength of the agreement between the predicted results and the simulation results. The validation of the proposed models using ANOVA is the focus of this section. This is accomplished by optimizing the parameters based on the lowest temperature difference, then applying these parameters to the previously designed 3D model using the COMSOL software, and comparing the simulation results to the predicted results of the mathematical models provided by ANOVA.

2.2.5.3.1 Numerical Optimization of Temperatures Difference

The technique of statistical analysis optimization ANOVA looks for a set of parameter levels that satisfy all of the requirements for each of the responses and parameters simultaneously. The objectives of the current study are to reduce the temperature difference between the tip and the root, as well as the temperature difference between the edge and the middle at the tip and the root

simultaneously. The results of the optimization procedure are shown in [Table 2.6](#), which shows the predicted responses when adjusting the ANOVA-optimized parameters. The composite desirability (D) of the settings is used to evaluate how effectively they optimize a set of responses overall. Desirability is measured on a scale of zero to one. One represents the ideal situation, whereas zero indicates that one or more responses are out of the accepted limits. As a result, the value of the composite desirability shown in the optimization table is very close to one, indicating the high quality of the optimization process.

Table 2.6 *The optimized results of temperature difference at optimal parameter conditions.*

A	B	C	D	E	TRE-TRM	TTE-TTM	TTM-TRM	TTE-TRE	Composite Desirability
3.78636	16.9667	0.3	0.212727	0.6	10.4419	9.90215	0.323332	0.595612	0.960962

2.2.5.3.2 Final Simulation Validation

The ANOVA-based optimization results were validated using simulation confirmatory tests. [Table 2.7](#) shows the simulation-tested results of experiments at optimum parameter conditions. As shown, there is a very small error percentage between predicted and simulated values, which validates the used optimization technique while also confirming the previously obtained statistical results and predicted models.

Table 2.7 *The optimization validation test results.*

Response	Parameter					Results	
	A	B	C	D	E		
TRE-TRM	3.78636	16.9667	0.3	0.212727	0.6	Actual	10.38
						Predicted	10.4419
						Error%	0.59
TTE-TTM	3.78636	16.9667	0.3	0.212727	0.6	Actual	9.6
						Predicted	9.90215
						Error%	3.15
TTM-TRM	3.78636	16.9667	0.3	0.212727	0.6	Actual	0.35
						Predicted	0.323332
						Error%	7.6
TTE-TRE	3.78636	16.9667	0.3	0.212727	0.6	Actual	0.63
						Predicted	0.595612
						Error%	5.46

2.2.6 Conclusions

This work provides a complete study of the sensitivity of the profile temperature and the temperature difference between the four ends of the tooth head by employing the ANOVA statistical study. This study explains the importance of each parameter, the degree of its influence, and the percentage of its contribution to the hardening process in order to achieve a comprehensive understanding of the effect of using the sequential dual-frequency approach in induction heating and its importance in reaching the uniform contour pattern for the hardened profile.

The results obtained from the ANOVA indicate that in order to obtain the best contour pattern of the hardened profile, the sequential dual-frequency induction heating parameters must be engineered and designed with high quality and great precision, as this study demonstrated that all of the parameters work together to achieve the lowest difference in temperatures between the tip and the root of the tooth and between the edge and the middle of both the tip and the root.

The results obtained in this study also show that the mathematical models proposed by ANOVA for predicting temperature and temperature difference are able to predict with high accuracy and great quality.

2.2.7 Références Bibliographiques

- [1] Cohen, J., Funatani, K., Bell, T. and Totten, G., 2000. *Heat Treating: Advances In Surface Engineering: An International Symposium In Honor Of Professor Tom Bell And Professor Jerome B. Cohen Memorial Symposium On Residual Stresses In The Heat Treatment In*. Materials Park, OH, St. Louis, Mo: ASM International.
- [2] Istardi, D., & Triwinarko, A. (2011). Induction Heating Process Design Using COMSOL Multiphysics Software. *Telkomnika*, 9(2).
- [3] Dossett, J. L., Totten, G. E., & ASM Handbook Committee (Eds.). (2013). *ASM Handbook: Steel Heat Treating, Fundamentals and Processes. Volume 4A*. Asm International.
- [4] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). *Handbook of Induction Heating* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [5] Barka, N. (2017). *Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction—2D model*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4), 1173–1181. doi:10.1007/s00170-017-0586-5.
- [6] Zinn, S. and Semiatin, S., 1988. *Elements Of Induction Heating: Design, Control, And Applications*. Metals Park, OH: ASM.
- [7] Kula, E. (2013). *Residual stress and stress relaxation* (Vol. 28). Springer Science & Business Media.
- [8] Rapoport, E. and Pleshivtseva, Y., 2007. *Optimal Control Of Induction Heating Processes*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis.
- [9] Davies, J. (1989). *Conduction and induction heating* (Energy Engineering) (Vol. 11). IET.
- [10] Barglik, J., Smalcerz, A., & Smagor, A. (2015, October). Induction hardening of small gear wheels made of steel 50CrMo4. In *8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*.
- [11] Schwenk, M., Fisk, M., Cedell, T., Hoffmeister, J., Schulze, V., & Lindgren, L. E. (2012). Process simulation of single and dual frequency induction surface hardening considering magnetic nonlinearity. *Materials Performance and Characterization*, 1(1), 1-20.
- [12] Tavakoli, M., Karbaschi, H., & Samavat, F. (2009). Computational Modeling of Induction Heating Process. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 11, 93-102. doi: 10.2528/PIERL09071509
- [13] Rudnev, V. (2008). Induction hardening of gears and critical components, Part 2. *Gear Technology*, 47-53.
- [14] Przyłucki, R., & Smalcerz, A. (2013). Induction heating of gears-pulsing dual-frequency concept. *Metalurgija*, 52(2), 235-238.
- [15] Hammi, H., El Ouafi, A., & Barka, N. (2016). Study of frequency effects on hardness profile of spline shaft heat-treated by induction. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(03), 1.
- [16] Hammi, H., Barka, N., & El Ouafi, A. (2015). Effects of induction heating process parameters on hardness profile of 4340 steel bearing shoulder using 2D

- [17] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2018). *Correction to: Sensitivity study of hardness profile of 4340 steel disc hardened by induction according to machine parameters and geometrical factors*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-018-3050-2.
- [18] Selvi, S. P., Kumar, P. S., & Vishwanathan, N. (2014, December). Design and control of two-inverter dual frequency induction hardening. In *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [19] Liu, P., Wang, Y., Li, J., Lu, C., Quek, K. and Liu, G., 2003. Parametric study of a sprocket system during heat-treatment process. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(1), pp.25-40.
- [20] Grum, J., 2003. Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction surface hardening and finish grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(3), pp.173-182.
- [21] Rodríguez, A. A., & Valli, A. (2010). *Eddy current approximation of Maxwell Equations: Theory, algorithms and applications*. Milan, New York: Springer.
- [22] Monk, P. (2003). *Finite element methods for Maxwell's equations*. Oxford University Press.
- [23] Yuan, J., Kang, J., Rong, Yiming , Sisson, Richard D. (2003). FEM Modeling of Induction Hardening Processes Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(5), 589-596.
- [24] Hodek, J., Zemko, M., & Shykula, P. (2015, October). Finite Element Model of Gear Induction Hardening. In *8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*.
- [25] Zabett, A., & Mohamadi Azghandi, S. (2012). Simulation of induction tempering process of carbon steel using finite element method. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 415-420. doi:10.1016/j.matdes.2011.10.052
- [26] Jelaska, D. T. (2012). *Gears and gear drives*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- [27] Mott, R. L., Vavrek, E. M., & Wang, J. (2018). *Machine elements in mechanical design* (6th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- [28] Kanehira, M. and Otoshi, K., 1997. *The Complete Guide To Chain*. Wheeling, IL: US Tsubaki.
- [29] Bhandari, V., 2010. *Design Of Machine Elements*. 3rd ed. McGraw-Hill Education - Europe: McGraw-Hill Education (India).
- [30] Campbell, J., 1990. *Dibble Sticks, Donkeys, And Diesels*. Manila, Philippines: International Rice Research Institute
- [31] Sergeev, S. A., & Moskalev, D. V. (2009). Parametric optimization of chain-transmission sprockets. *Russian Engineering Research*, 29(5), 452-455.
- [32] Barka, N., Chebak, A., El Ouafi, A., Jahazi, M., & Menou, A. (2014). A new approach in optimizing the induction heating process using flux concentrators: application to 4340 steel spur gear. *Journal of materials engineering and performance*, 23(9), 3092-3099.

- [33] Bringas, J. E. (2004). Handbook of comparative world steel standards (ASTM DS67B). In *Library of Congress Cataloging*.
- [34] Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
- [35] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2019). *Reduction of edge effect using response surface methodology and artificial neural network modeling of a spur gear treated by induction with flux concentrators*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-019-03817-9.
- [36] Taguchi, G. (2004). Taguchi's Quality Engineering Handbook/Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yuin Wu.
- [37] Sawyer, S. (2009). Analysis of Variance: The Fundamental Concepts. *Journal Of Manual & Manipulative Therapy*, 17(2), 27E-38E. doi: 10.1179/jmt.2009.17.2.27e.

CHAPITRE 3

SIMULATION NUMÉRIQUE POUR L'UTILISATION DU CONCEPT SIMULTANÉ DE DOUBLE FRÉQUENCE DANS LE DURCISSEMENT PAR INDUCTION D'UN PIGNON EN ACIER 4340 - MODÈLE 3D

3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE

Le chauffage par induction est la méthode la plus courante et la meilleure sur le plan environnemental, la plus efficace en matière d'automatisation, la plus rapide dans la pratique avec la plus grande application dans l'industrie automobile et aéronautique. De plus, c'est celle qui a le plus haut niveau de sécurité combiné avec le moindre effort et la moindre déformation de la pièce. Cet article a été développé pour étudier un modèle 3D d'un échantillon de pignon chauffé par le processus de chauffage par induction simultané à double fréquence. Les efforts de simulation numérique basés sur l'électromagnétisme et le transfert de chaleur étroitement sont couplés en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics et en tenant compte des propriétés des matériaux et des paramètres de la machine afin d'étudier ce que cette approche, ses caractéristiques et ses avantages ajoutent au processus de chauffage par induction et ainsi savoir la différence entre son utilisation et l'utilisation d'une seule fréquence. Cette étude fournit un modèle intégré capable de décrire le processus de manière précise et claire. Les résultats sont très prometteurs car ils expliquent pleinement les caractéristiques de l'approche simultanée à double fréquence dans le chauffage par induction, en particulier dans la trempe de formes géométriques complexes permettant l'application de ce modèle dans la trempe d'autres formes géométriques à l'avenir.

Mots clés : Chauffage par induction, SDF, pignon, contour, simultané, concentrateur de flux.

Ce troisième article est intitulé « Simulation Numérique Pour L'utilisation Du Concept Simultané De Double Fréquence Dans Le Durcissement Par Induction D'un Pignon En Acier 4340 - Modèle 3D ». Il a été co-écrit par le Professeur Noureddine Barka et par moi-même. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2021 par le *Journal of Advanced Materials Research (AMR)*. Ma contribution à ce travail a consisté à faire une revue de la littérature, à rechercher les dernières découvertes des scientifiques, chercheurs et industriels sur la technologie utilisée dans cet article, à concevoir un modèle de simulation, à développer une approche, à gérer les résultats et les données ainsi qu'à rédiger l'article. Le professeur Noureddine Barka a participé à la présentation de l'idée originale et a également contribué à la recherche des dernières découvertes scientifiques et à la révision de l'article.

3.2 NUMERICAL SIMULATION FOR USING THE SIMULTANEOUS DUAL-FREQUENCY CONCEPT IN INDUCTION HARDENING OF A 4340 STEEL SPROCKET -3D MODEL.

3.2.1 Abstract

Induction heating is the most widely used technique, the most environmentally friendly, the most efficient in automation, the quickest in practice, the most widely used in the automobile and aircraft sectors, the greatest degree of safety, the least effort, and the least workpiece deformation.

This paper was developed to study a 3D model of a sprocket sample heated by the simultaneous dual-frequency induction heating process. The numerical simulation efforts based on tightly coupled electromagnetism and heat transfer using COMSOL Multiphysics software considering the material properties and the machine parameters, in order to investigate what this approach, its features, and benefits add to the induction heating process and determine what is the difference between its use and the use of single frequency.

This study provides an integrated model capable of describing the process accurately and clearly. The results are very useful and promising, as they fully explain the features of the simultaneous dual-frequency approach in induction heating, especially in the hardening of complex geometric shapes, and allow the application of this model in the hardening of other geometric shapes in the future.

Keywords: Induction heating, SDF, Sprocket, contour, Simultaneous, Flux concentrator.

3.2.2 Introduction

Induction heating occupies a prestigious rank and position among the industry and industrialists, especially in the field of automobile, aircraft, and production lines, due to its speed, quality, cleanliness, and the ability to automate it with very high efficiency and accuracy [1-2].

Because its primary characteristic is that the heat produced in the workpiece owing to the skin effect heats the targeted regions without heating the rest of the workpiece, it is extensively and frequently utilized in heating applications [3-4], particularly in hardening. Because hardening just the required regions without hardening the rest of the workpiece results in a desirable residual stress distribution condition on the surface, which significantly increases contact fatigue strength and avoids the development or propagation of fractures on the workpiece's surface [5-6]. This is what compelled academics, engineers, and manufacturers to work on it indefinitely and constantly. The industry's challenges in utilizing a single frequency in the hardening process, particularly for gears, led researchers to develop a method for achieving a uniform hardness profile for complex geometrical shapes. As a result, the dual-frequency method was proposed for use in the induction heating process.

The dual-frequency method to induction heating is not a new concept. Rather, it began in the mid-1950s with the Pulsing dual-frequency (PDF) concept for heating large gears and other complicated engineering shapes [7-8]. It is a dual-frequency concept that was created to achieve a contour hardening profile for helical and straight spur gears, in which the workpiece is first heated to a specific temperature using medium frequency (MF), and then heated to the final temperature using high frequency (HF). The HF completes the heating process started by the MF to achieve the austenitic temperature in both the root and tip of the gears. However, the existence of dwell time between the medium and high frequencies causes a temporal delay, which has a negative impact on the hardness patterns. On the other hand, the process's high cost and complexity limited its use and practical application in engineering equipment, where the induction heating process relied on trial and error to achieve the best rigidity pattern, and there were insufficient studies to reduce the time or cost of the operation [9-10].

Due to the shortcomings of the PDF concept in terms of cost, time, and mechanical operation difficulties, the simultaneous dual-frequency concept (SDF) was created, in which two currents, one of medium frequency and the other of high frequency, are applied to the workpiece simultaneously [11-12]. The SDF has piqued the interest of researchers and developers, owing to its ability to produce a uniform contour pattern of the hardness profile of gears in the fastest way possible [13-16].

Researchers Diong et al. [17], Selvi et al. [18] have succeeded in explaining the design and control aspects of the dual-frequency inverters used in hardening of gears and other mechanical parts, providing a full explanation of the design of electrical circuits and simulation of the outgoing waveform, and explaining the extent of increasing control, improving operation and achieving high efficiency when using the dual-frequency approach in the hardening process.

Dongwon Yun et al. [19] describe the development of induction heating tools based on the SDF method by applying it to a two-dimensional gear model, then hardening the gears on the induction heating machine and comparing the results. Hömberg et. al. demonstrated through their numerical study of induction heating that only by using the SDF approach can a uniform contour pattern of the hardening gear be obtained [20]. Prof. Barka et al. [21] used MF and HF separately to investigate the impact of asymmetry in heating on the stiffness profile of irregular geometric forms such as helical gear.

V. Esteve et al. [22] showed in their research that using dual-frequency induction hardening for components with difficult, complicated, or irregular geometry is the economic solution in terms of heating time and improving the hardening quality [23]. However, there is a paucity of studying the effect of the SDF concept on the temperature distribution around the hardness profile and on the case depth of the hardened part.

In general, the coil and the workpiece determine the pattern of hardness in terms of material and geometry in the induction heating process, but it is sometimes very useful to increase control over that pattern by adding flux concentrators, as these concentrators work to find a better path for the magnetic field lines in order to improve the temperature distribution around the workpiece profile. As a result, the energy needed for heating is reduced, and the temperature gradient between the tip

and root of the primary tooth is improved. Therefore, two flux concentrators were developed and included in this study's finite element model [24-26].

This article intends to provide a full and comprehensive numerical analysis of the induction heating process using the SDF method, as well as to explain the benefits and advantages that this approach imparts on the process of hardening complex geometric shapes.

A three-dimensional model was developed to investigate the application of the SDF approach to heating a steel sprocket sample. We want to obtain a uniform contour pattern of the hardened profile in which the temperature distribution at both the tip and the root of the sprocket's tooth is nearly uniform before quenching. The contouring pattern has many benefits that increase the fatigue life of the workpiece [1, 27]. The hardening case depth value is then monitored using the temperature results to explain the impact of utilizing the SDF approach on the case depth.

The simulation attempts were performed using COMSOL Multiphysics software, using finite element simulation based on the coupling of electromagnetism and heat transfer studies to accurately and completely characterize the physical process.

3.2.3 Formulation

Several complex physical laws make up a complete description of the induction hardening modeling system: The distributions of induced currents and power densities within the heated workpiece may be determined using Maxwell's equations, while the thermal field in the heated workpiece can be predicted using Fourier's law [28]. The law of electromagnetic induction, Ohm's law, the law of Joule-Lenz, and the phenomena of skin-effect, proximity-effect, ring-effect, and slot effect, all of which are a consequence of the law of electromagnetic induction [12], are all important to the process. Using the SDF concept, to explain and evaluate the induction heating process. The magnetic field is first described by the magnetic vector potential $\mathbf{A}$, which is related to the magnetic flux. However, due to the disproportion between the field current frequency f and the time of heating t_c , even such a formulation solution is hard, a large number of time steps are needed. The model is simplified by the assumption that the magnetic field is harmonic, and the phasor of the magnetic vector potential $\mathbf{A}$ may be represented using the Helmholtz equation [19, 29-30].

$$\text{curl} \frac{1}{\mu\mu_0} \text{curl} \mathbf{A} = -\mathbf{J}_s + j\omega\sigma\mathbf{A} + \sigma(\mathbf{v} \times \text{curl} \mathbf{A}) \quad (1)$$

Where (μ) denotes the magnetic permeability, (σ) the electric conductivity, ($\mathbf{v}$) the inductor movement in relation with the body, ($\mathbf{J}_s$) the source field current density, and (ω) the angular frequency of the current it expressed as follows:

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

Where (f) is the current frequency used by generator.

In this study, (v) is a zero. Thus, based on **Equation (1)**, the eddy current density (J_e) can be expressed in the following equation:

$$J_e = \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad , \quad J_e = -j\omega\sigma A \quad (3)$$

Because two currents are applied to the coil simultaneously in the SDF method, and each current has a different value and frequency than the other, there are two governing equations for electromagnetic field harmonic analysis, as illustrated in the following two equations:

$$\text{curl} \frac{1}{\mu\mu_0} \text{curl} A = -J_{s1} + j\omega_1\sigma A \quad (4)$$

$$\text{curl} \frac{1}{\mu\mu_0} \text{curl} A = -J_{s2} + j\omega_2\sigma A \quad (5)$$

Where J_{s1}, J_{s2} , ω_1 , and ω_2 represent source field current density of HF, source field current density of MF, high angular frequency, and medium angular frequency, respectively.

As a result, the heat generated inside the workpiece will be caused by eddy currents generated by two different alternating current waves. Joule-Lenz's law can be used to calculate the heat generated inside the workpiece (Q_{ind}) as follows:

$$\dot{Q}_{\text{ind}_1} = \int_v |J_{e1}|^2 \sigma^{-1} \cdot dv \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{\text{ind}_2} = \int_v |J_{e2}|^2 \sigma^{-1} \cdot dv \quad (7)$$

As previously stated, Fourier's law is utilized to describe the heat transferred inside the workpiece and is represented by the Fourier equation [31-32]:

$$\gamma C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (\dot{Q}_{\text{ind}_1} + \dot{Q}_{\text{ind}_2}) \quad (8)$$

Where T denotes the temperature. k , C_ρ , and γ are physical properties local temperature-dependent and represents respectively the thermal conductivity, the specific heat, and the mass density of workpiece material.

3.2.4 Simulation

In this article, the SDF concept was used to apply induction heating to a sample of a sprocket, which differs from a gear in that they are intertwined with each other by an intermediate link such as synchronous belts or chain, but the gear is intertwined with another gear [33]. At the same time, the sprocket cannot be described as a pulley since the sprocket contains teeth to link with the chain, while the pulley is smooth and without teeth [22]. As a result, the sprocket is known in mechanical engineering as a mechanical drive with immovable axes that fall into transmission using mesh with flexible connection (chain drive or synchronous belts), and the mutual position of the driving wheel and the driven wheel is indirect. On the other hand, it is known as toothed wheels to provide a

positive mechanical drive desirable at the low-speed, high torque conditions [34-35]. The geometric complexity of the sprocket design makes achieving a uniform contour pattern of hardness profile with a single frequency challenging [9]. Sprockets are extensively utilized and common in the transportation industry, such as cars, bicycles, and motorcycles. They are also frequently employed in production lines, hoists, and other significant industrial applications [36-37].

3.2.4.1 Model's Geometry

On COMSOL Multiphysics software, a 3D model of a sprocket sample with 104 mm outer diameter, 16 mm inner diameter, 7 mm thickness and 24 teeth, was created to be used in this numerical study. The coil is made of copper and has an inner diameter of 110 mm, an outer diameter of 140 mm, and a thickness of 7 mm. The model was created in an air environment while accounting for its dielectric permeability ($\mu_r = 1$) and vacuum permittivity ($\epsilon_r = 1$). The work of Barka et al. [38] was then used to add two flux concentrators to the model with the same geometry as the sprocket's main tooth.

Because of the symmetric and periodic conditions, it was possible to reduce both the main tooth and the coil to a quarter and the two flux concentrators to a half concentrator, which greatly reduced the time spent on calculation while also increasing the accuracy of the simulation results by improving the mesh quality.

Figure 3.1 depicts the final design of the three-dimensional model that will be used in this study, and Figure 3.2 depicts the points of the four identified locations on the head of the main sprocket tooth where temperature will be monitored in this study.

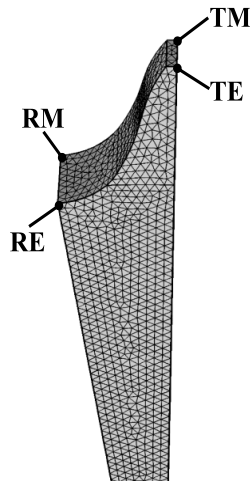


Figure 3.1 The four ends of the main tooth head.

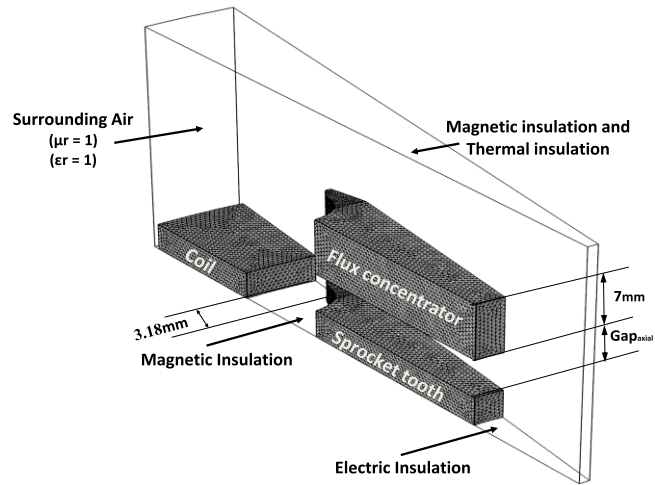


Figure 3.2 The final design of the FE model with the final mesh size.

3.2.4.2 Material

The hardened sprocket sample that we considered in this study is made of low alloy steel AISI 4340, which is a heat treatable [21, 39]. It is well suited to the induction hardening process because to its carbon content and alloying elements, which enhance hardenability and mechanical properties. It is well-known for its toughness and ability to produce high strength in heat-treated conditions while maintaining excellent fatigue strength [40-41]. The chemistry data of AISI 4340 is given below [42].

Table 3.1 *Weight % of elements for alloy AISI 4340 steel.*

Fe	Ni	Cr	Mn	C	Mo	Si	S	P
95.195-96.33	1.65-2	0.7-0.9	0.6-0.8	0.37-0.43	0.2-0.3	0.15-0.3	0.04	0.035

Knowing the chemical properties of the material to be hardened is critical, particularly knowing the minimum temperature at which the metallurgy of the material transitions into the austenite phase, which then transitions into martensite after quenching, as well as the upper temperature of heating to avoid melting of the material.

In the case of AISI 4340 steel, the lowest temperature at which the material transforms into austenite is 850 °C. The maximum temperature that may be reached before the material melts is 1300 °C [43].

3.2.4.3 Process Parameters

The hardness pattern of the hardened profile depends on many physical and chemical characteristics of the material to be hardened, as well as different induction heating parameters and design engineering factors for the design [13, 44]. The parameters and factors must be qualified and carefully adjusted in order to achieve a uniform hardness profile.

In this study, the imposed current density for the MF (J_{sMF}), the imposed current density for the HF (J_{sHF}), the heating time (t_h) and the axial gap between the flux concentrators and the main tooth (Gap_{axial}) were chosen as the main parameters of the induction heating process to be modified and set to reach and obtain the uniform contour pattern of the hardness profile. In this study, it was assumed that the MF is equal to 10 kHz and the HF is equal to 200 kHz in order to heat the tooth of the sprocket.

3.2.4.4 Meshing

The process of selecting the optimal mesh for the model is critical in analyzing the finite element method (FEM) in terms of mathematical accuracy and reliability of the results [45]. The numerical simulation of the model was subjected to a convergence study in order to determine the

optimal mesh size at which the FEM simulation results would be reliable. The current density at medium and high frequencies, the heating time, and the gap between the main tooth and the flux concentrators are the process parameters that were selected to achieve a reference martensite temperature of 1000 °C.

The results in **Figure 3.3** demonstrate that the temperature is stable at the ends of the tooth head starting with a mesh size of 0.5 mm. To save calculation time, the mesh size in this study was set to 0.5 mm, resulting in a mesh with 252746 elements and 707688 degrees of freedom. **Figure 3.1** shows the final mesh design on the model.

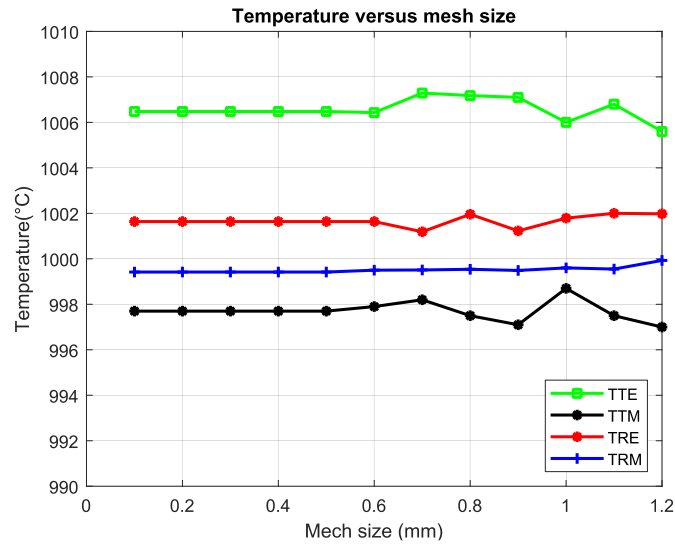


Figure 3.3 *Temperature monitoring with mesh size.*

3.2.5 Results and Discussion

It is well known in SDFC induction heating that the MF is concerned with the root hardness of the tooth because the magnetic field lines are concentrated on the surface farthest from the coil, whereas the HF is concerned with the hardness of the tooth tip because the field lines are concentrated on the surface closest to the coil. As a result, parameter adjustment was a sensitive procedure that required a significant number of simulation experiments.

Figure 3.4 depicts a flowchart that summarizes the steps of the study procedure method. By adjusting the parameters and monitoring the temperature, a large number of numerical simulation experiments were carried out in this study in order to achieve a uniform contour pattern of the hardness profile of the main tooth at the lowest possible temperature that transforms the metallurgy of the material into austenite at both the tip and the root of the tooth.

3.2.5.1 Influence of the SDF Concept on the Temperature Distribution

The electromagnetic edge effect, which negatively affects the uniform shape of the sprocket hardness profile by focusing the magnetic field on the tip more than the root and on the edge more than the middle of the tooth [46-48], is one of the important factors that distort the pattern of the hardness profile.

Researchers and manufacturers are attempting to decrease this impact by adjusting the parameters to reduce the temperature difference between the tip and the root, as well as between the edge and the middle of the main tooth [25]. The process parameters were modified after a large number of numerical simulations of the finite element model, as shown in Table 3.2.

Figure 3.5 depicts the temperature evolution with time at TE, TM, RE, and RM during simultaneous heating by MF and HF, as the temperature increases non-linearly with increasing time due to the material's non-linear physical properties. The results show that the temperature at both the root and the tip increases by an approximate and harmonic amount with time, demonstrating the impact of HF and MF in heating.

Table 3.3 presents the final temperature at each end of the main quarter tooth head, as well as the temperature difference between the tip and the root's edge and middle, and the temperature difference between the tip and the root at both the edge and the middle. The results demonstrate that the temperature difference is very small, and it is never comparable to the temperature difference produced when using the single frequency.

This illustrates and indicates that using the SDF approach in the hardening process dramatically reduces the edge effect till it is virtually insignificant, which is a major benefit of this approach. The final temperature distribution around the profile of the main tooth quarter is shown in Figure 3.6. The shape of the temperature distribution seems to be almost uniform at both the edge and the middle of the tooth, as illustrated. This indicates the SDF approach's considerable beneficial impact on the uniform contour pattern of hardness.

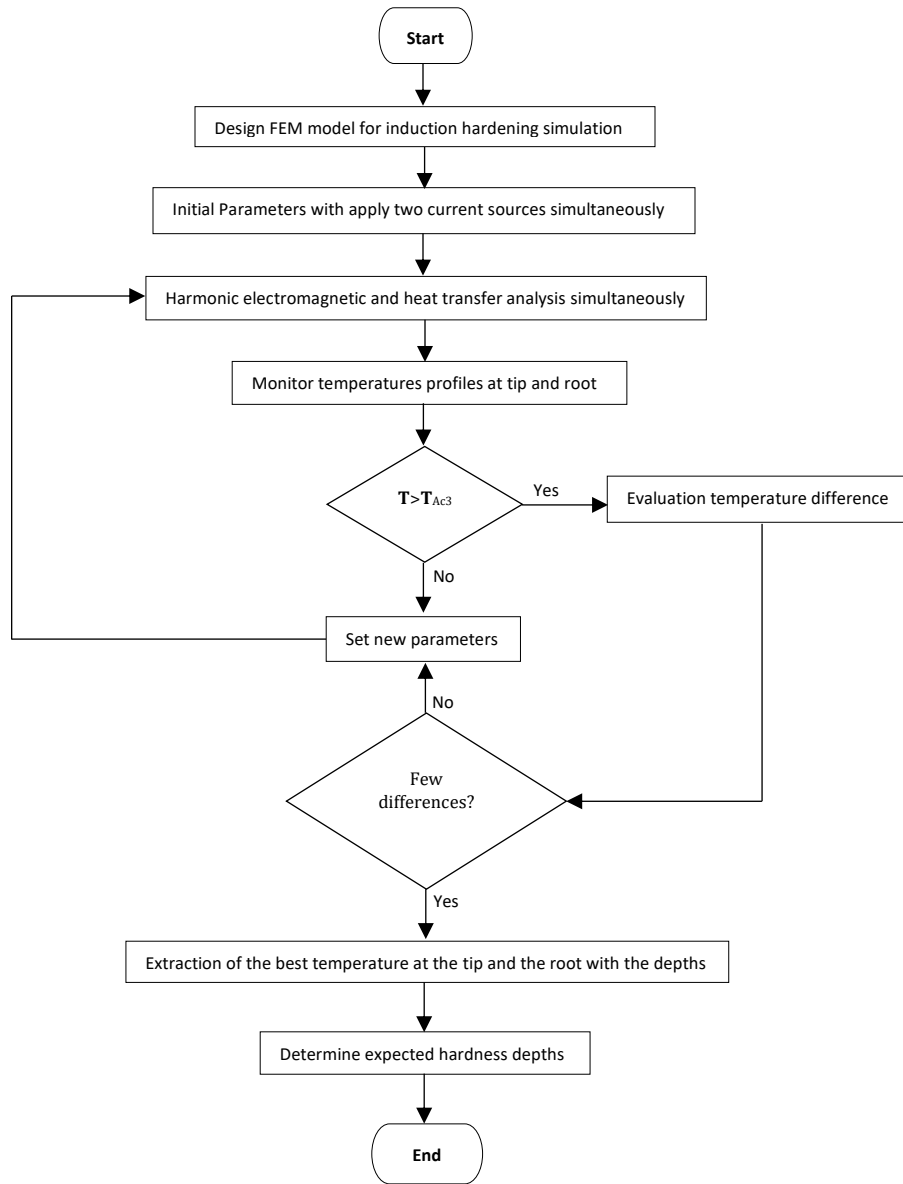


Figure 3.4 Flowchart of the FEM study procedure.

Table 3.2
Simulation parameters of induction hardening process.

Parameters	$J_{sMF} \times 10^{10} \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$	$J_{sHF} \times 10^{10} \text{ (A.m}^{-2}\text{)}$	$t_h \text{ (s)}$	$\text{Gap}_{axial} \text{ (mm)}$
	3.00	11.50	0.50	0.60

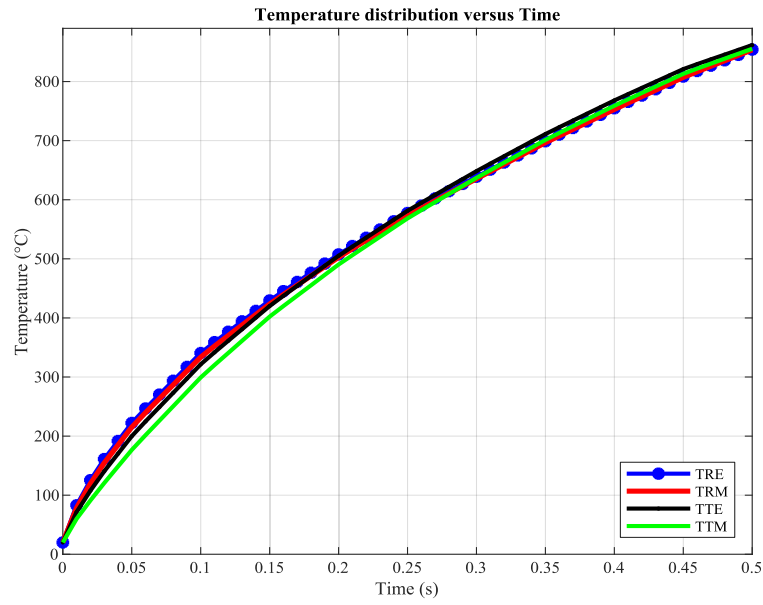


Figure 3.5 Temperature evolution with time during HF and MF simultaneously.

Table 3.3 Simulation results.

Temperature °C				Temperature difference °C			
TTE	TTM	TRE	TRM	TTE-TRE	TTM-TRM	TTE-TTM	TRE-TRM
861.68	855.5	854.14	853.64	7.54	1.86	6.18	0.5

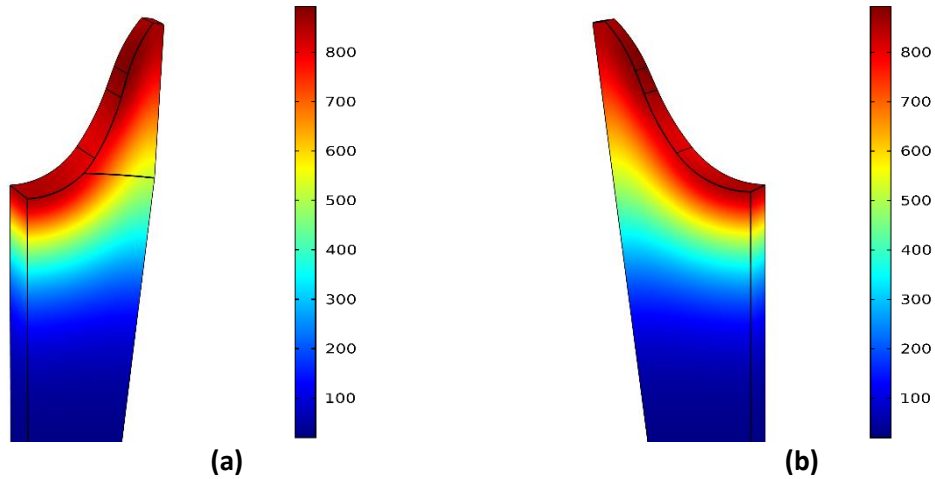


Figure 3.6 Temperature (°C) distribution at the end of heating. a Edge. b Middle.

3.2.5.2 Influence of the SDF Concept on the Case Depth

The heat treatment process aims to enhance the workpiece's surface hardness and fatigue life. Heat treatment in the induction hardening process is primarily based on an electromagnetic property known as the skin effect, which is the property that produces the eddy current inside the workpiece. This causes the surface to be heated to different depths depending on the frequency of the supplied current; this depth is referred to as case depth [49].

This section explains how the SDF concept impacts the hardness profile's case depth. Initially, the temperature along the edges of the main quarter tooth had to be monitored, followed by the case depth (d_s) before to A_{C3} , the depth indicating a low hardness value (d_L) between A_{C3} and A_{C1} , and the overall depth affected by heating (d_C) prior to T_0 . while A_{C1} and A_{C3} have critical transformation temperatures of 825 °C and 850 °C, respectively, and the T_0 express temperature of 640 °C has a substantial impact on the material. Barka et al. [50] used the approach of calculating the depths impacted by heat treatment based on the temperature gradient along with the tooth.

Figure 3.7 depicts the temperature gradient along the root and tip's edge and middle. These graphs show a congruence in the temperature gradient between the edge and the middle of the tooth, which is further evidence of the SDF concept's potential to significantly reduce the edge effect. Temperatures with depth along the tooth edges were extracted from these graphs at the same time.

The obtained depth results shown in **Table 3.4** indicate the convergence between the depth of the case for the edge and the middle at both the tip and the root, which is a magnificent impression that predicts obtaining a semi-uniform shape for the case depth and thus obtaining the contour pattern of the hardness profile. The results also show the amount of overtempring depth, which is the depth affected by heat treatment, except for the case depth, as researchers seek to reduce this depth during heat treatment. In this research, the overtempring depth was calculated to demonstrate how much high control the SDF approach allows. In the induction hardening process, however, the use of two different frequencies significantly increases the amount of control and adjustment of the process parameters to reduce the overtempring depth.

Figure 3.8 shows the approximate visualization of the hardness curve of the sprocket tooth tip at the edge when applying the SDF approach on induction hardening.

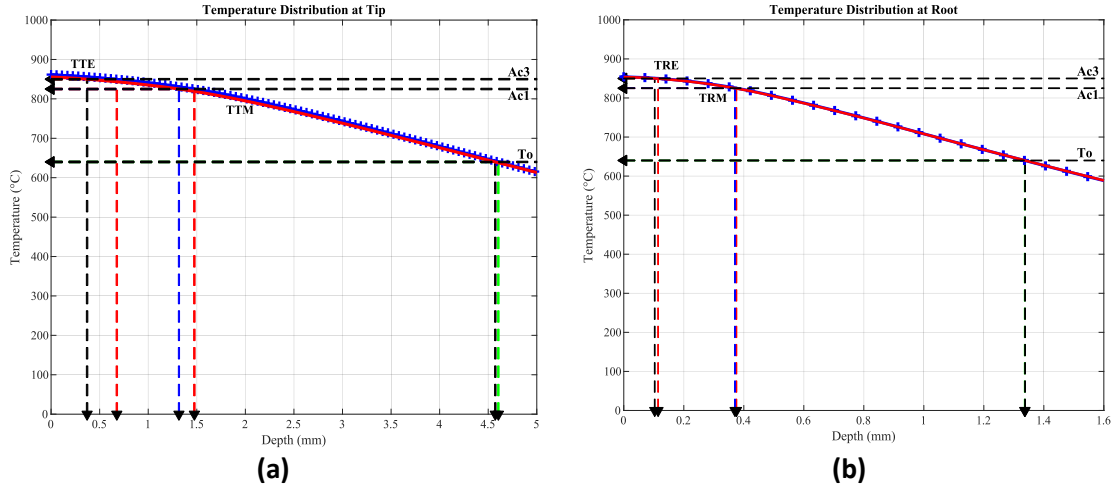


Figure 3.7 Temperature (°C) distribution with depth (mm). a Tip. b Root.

Table 3.4 Simulation depth results when applying the SDF approach.

	Depth length (mm)			
	TIP		ROOT	
	Edge	Middle	Edge	Middle
ds	0.677	0.370	0.114	0.131
dc	4.604	4.573	1.336	1.337
dL	1.475	1.316	0.375	0.371
Overtempring (dc-ds)	3.927	4.203	1.222	1.206

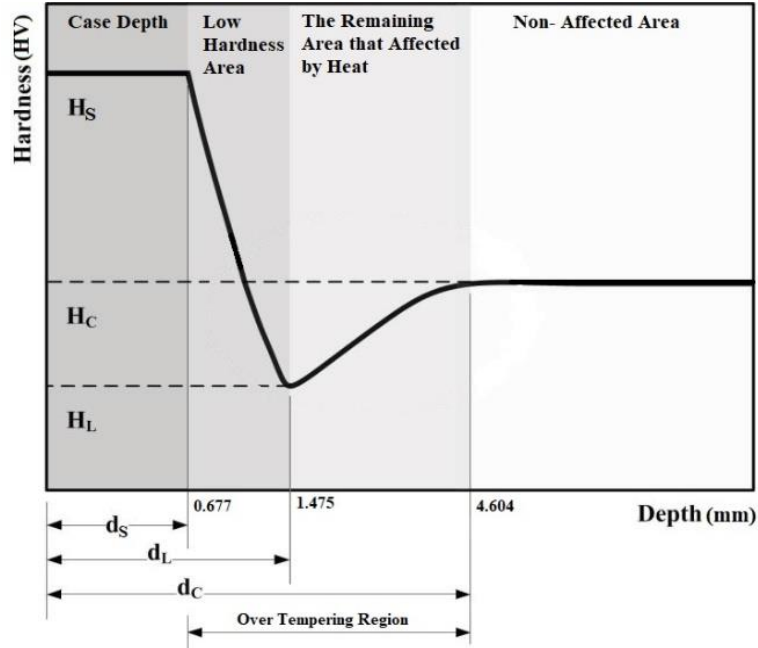


Figure 3.8 Expected hardness curve for the hardened profile of the sprocket at the edge of the tip.

3.2.6 Conclusions

This study was presented by following a research strategy based on a numerical study to simulate a 3D FE model of a sprocket made of AISI 4340 that is hardened by dual-frequency induction heating with the concept of SDF.

The simulation findings revealed that the temperature difference between the root and the tip at each of the edge and the middle, as well as the temperature difference between the tip and the middle of the root and the tip of the tooth, do not exceed 8 °C. The depths derived from the temperature gradient along the rims of the tooth revealed that the difference in case depth between the edge and the center of both the tip and the root of the tooth is extremely tiny.

This study exhibited that one of the most appropriate, fastest, and most economical ways to achieve a uniform contouring profile for complex geometries such as gears and sprockets is to use the SDF approach in the induction heat-treatment process.

The findings indicate that this research may serve as a springboard and essential enabler for many future investigations, such as investigating the impact of process factors on temperature distribution or case depth using statistical techniques. This study was presented by following a research strategy based on a numerical study to simulate a 3D FE model of AISI 4340 sprocket that is hardened by dual-frequency induction heating with the concept of SDF.

3.2.7 Références Bibliographiques

- [1] Brayman, S., Kuznetsov, A., Nikitin, S., Binoniemi, B., & Rudnev, V. (2011). Cost effective technology for induction contour hardening of bevel, hypoid, and pinion gears. In *Heat Treating 2011: Proceedings of the 26th Conference* (p. 151). ASM International.
- [2] Toi, Y., & Takagaki, M. (2008). Computational Modeling of Induction Hardening Process of Machine Parts. *Proceedings Of The World Congress On Engineering And Computer Science*, 22-24.
- [3] Choi, J.-K., Park, K.-S., & Lee, S.-S. (2018). Predicting the hardening depth of a sprocket by finite element analysis and its experimental validation for an induction hardening process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(3), 1235–1241. doi:10.1007/s12206-018-0227-4.
- [4] BARGLIK, J. (2018). Induction hardening of steel elements with complex shapes. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(4), 53-56. doi: 10.15199/48.2018.04.13
- [5] Grum, J., 2003. Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction surface hardening and finish grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(3), pp.173-182.
- [6] Totten, G., Howes, M. and Inoue, T., 2002. *Handbook Of Residual Stress And Deformation Of Steel*. Materials Park, OH: ASM International.
- [7] Rudnev, V. (2008). Induction hardening of gears and critical components, Part 2. *Gear Technology*, 47-53.
- [8] Barka, N. (2017). Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction—2D model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4), 1173–1181. doi:10.1007/s00170-017-0586-5.
- [9] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). *Handbook of Induction Heating* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [10] Przyłucki, R., & Smalcerz, A. (2013). Induction heating of gears-pulsing dual-frequency concept. *Metalurgija*, 52(2), 235-238.
- [11] Wrona, E., Nacke, B., & Resetov, D. (2003, March). 3D-modelling of the transient heating process for induction surface hardening. In *MEP-International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing, Hanover* (pp. 119-123).
- [12] Lupi, S., Forzan, M., & Aliferov, A. (2015). Induction and direct resistance heating. *Switzerland: Springer*.
- [13] Rapoport, E. and Pleshivtseva, Y., 2007. *Optimal Control Of Induction Heating Processes*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis.
- [14] Rudnev, V.I. (2009). Single-coil dual-frequency induction hardening of gears. *Heat Treating Progress*. 9. 9-11.
- [15] Okudaira, S., & Matsuse, K. (2000, August). Power control of an adjustable frequency quasi-resonant inverter for dual frequency induction heating.

- In *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No. 00EX435)* (Vol. 2, pp. 968-973). IEEE.
- [16] Ishimaru, Y., Oka, K., Sasou, K., Matsuse, K., & Tsukahara, M. (2009). *Dual high frequency quasi-resonant inverter circuit by using power MOSFET for induction heating. 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*. doi:10.1109/ipemc.2009.5157833.
 - [17] Diong, B., Basireddy, S., & Corzine, K. (2003, November). Multilevel converter-based dual-frequency induction heating power supply. In *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No. 03CH37468)* (Vol. 2, pp. 1992-1997). IEEE.
 - [18] Selvi, S. P., Kumar, P. S., & Vishwanathan, N. (2014, December). Design and control of two-inverter dual frequency induction hardening. In *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 1-6). IEEE.
 - [19] Yun, D., Park, H., Koo, J. H., Ham, S., & Lee, S. (2015). Investigation of heat treatment of gears using a simultaneous dual frequency induction heating method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4.
 - [20] Hömberg, D., Petzold, T., & Rocca, E. (2015). Analysis and simulations of multifrequency induction hardening. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 22, 84-97.
 - [21] Wu, D. W., & Matsumoto, Y. (1990). *The Effect of Hardness on Residual Stresses in Orthogonal Machining of AISI 4340 Steel. Journal of Engineering for Industry*, 112(3), 245. doi:10.1115/1.2899582.
 - [22] Bhandari, V., 2010. *Design Of Machine Elements*. 3rd ed. McGraw-Hill Education - Europe: McGraw-Hill Education (India).
 - [23] Esteve, V., Jordan, J., Dede, E. J., Sanchis-Kilders, E., & Maset, E. (2006, March). Induction heating inverter with simultaneous dual-frequency output. In *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06*. (pp. 5-pp). IEEE.
 - [24] Zinn, S. and Semiatin, S., 1988. *Elements Of Induction Heating: Design, Control, And Applications*. Metals Park, OH: ASM.
 - [25] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2019). *Reduction of edge effect using response surface methodology and artificial neural network modeling of a spur gear treated by induction with flux concentrators. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-019-03817-9.
 - [26] Sabeeh, H. F., Abdulbaqi, I. M., & Mahdi, S. M. (2018, January). Effect of flux concentrator on the surface hardening process of a steel gear. In *2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)* (pp. 80-85). IEEE.
 - [27] Liu, P., Wang, Y., Li, J., Lu, C., Quek, K. and Liu, G., 2003. Parametric study of a sprocket system during heat-treatment process. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(1), pp.25-40.
 - [28] Yuan, J., Kang, J., Rong, Yiming, Sisson, Richard D. (2003). FEM Modeling of Induction Hardening Processes Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(5), 589-596.

- [29] Barglik, J., Smalcerz, A., Przylucki, R., & Doležel, I. (2014). 3D modeling of induction hardening of gear wheels. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 270, 231-240.
- [30] Monk, P. (2003). *Finite element methods for Maxwell's equations*. Oxford University Press.
- [31] Hodek, J., Zemko, M., & Shykula, P. (2015, October). Finite Element Model of Gear Induction Hardening. In *8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*.
- [32] Istardi, D., & Triwinarko, A. (2011). Induction Heating Process Design Using COMSOL Multiphysics Software. *Telkomnika*, 9(2).
- [33] Mott, R. L., Vavrek, E. M., & Wang, J. (2018). *Machine elements in mechanical design* (6th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- [34] Jelaska, D. T. (2012). *Gears and gear drives*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- [35] Thipprakmas, S. (2011). *Improving wear resistance of sprocket parts using a fine-blanking process*. *Wear*, 271(9-10), 2396–2401. doi:10.1016/j.wear.2010.12.015.
- [36] Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2012). *Fundamentals of Machine Component Design* (5th ed.). J. Wiley & Sons.
- [37] Ebhota Williams, S., Emmanuel, A., & Peter, O. (2014). Fundamentals of sprocket design and reverse engineering of rear sprocket of a Yamaha CY80 motorcycle. *International Journal of Engineering and Technology*, 4(4), 170-179.
- [38] Barka, N., Chebak, A., El Ouafi, A., Jahazi, M., & Menou, A. (2014). A new approach in optimizing the induction heating process using flux concentrators: application to 4340 steel spur gear. *Journal of materials engineering and performance*, 23(9), 3092-3099.
- [39] Nascimento, M. (2001). *Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel*. *International Journal of Fatigue*, 23(7), 607–618. doi:10.1016/s0142-1123(01)00015-9.
- [40] Khalifa, M., Barka, N., Brousseau, J., & Bocher, P. (2018). *Correction to: Sensitivity study of hardness profile of 4340 steel disc hardened by induction according to machine parameters and geometrical factors*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-018-3050-2.
- [41] Barka, N., Bocher, P., & Brousseau, J. (2013). Sensitivity study of hardness profile of 4340 specimen heated by induction process using axisymmetric modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9), 2747-2756.
- [42] Bringas, J. E. (2004). Handbook of comparative world steel standards (ASTM DS67B). In *Library of Congress Cataloging*.
- [43] Dossett, J. L., Totten, G. E., & ASM Handbook Committee (Eds.). (2013). *ASM Handbook: Steel Heat Treating, Fundamentals and Processes. Volume 4A*. Asm International.
- [44] Souley, M., Egalon, J., Caux, S., Pateau, O., Lefevre, Y., & Maussion, P. (2013). *Optimization of the Settings of Multiphase Induction Heating System*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6), 2444–2450. doi:10.1109/tia.2013.2264924.

- [45] Hammi, H., Barka, N., & El Ouafi, A. (2015). Effects of induction heating process parameters on hardness profile of 4340 steel bearing shoulder using 2D axisymmetric model. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 4, 41-48.
- [46] Barka, N., Chebak, A., & Brousseau, J. (2011, March). Study of edge effect of 4340 steel specimen heated by induction process using Axi-symmetric simulation. In *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Marrakesh, Morocco*.
- [47] Barka, N., Ouafi, A. E., Chebak, A., Bocher, P., & Brousseau, J. (2012). Study of induction heating process applied to internal gear using 3D model. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 232, pp. 730-735). Trans Tech Publications Ltd.
- [48] Nemkov, V., & Goldstein, R. (2003). Computer simulation for fundamental study and practical solutions to induction heating problems. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.
- [49] Grum, J. (2001). A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 114(3), 212–226. doi:10.1016/s0924-0136(01)00562-3.
- [50] Barka, N., El Ouafi, A., Bocher, P., Brousseau, J., & Chebak, A. (2013). Explorative study and prediction of overtempering region of disc heated by induction process using 2D axisymmetric model and experimental tests. In *Advanced Materials Research* (Vol. 631, pp. 417-423). Trans Tech Publications Ltd.

CONCLUSION GÉNÉRALE

En raison de ses nombreuses caractéristiques, la trempe par induction a fait l'objet de l'attention de nombreux chercheurs et industriels et c'est ce qui a fait que la trempe par induction a traversé le temps avec de nombreux développements visant à améliorer le processus et à obtenir une production élevée aux coûts les plus bas. En ce qui concerne la trempe par induction des engrenages, le dilemme auquel l'industrie est confrontée réside dans la difficulté d'obtenir un modèle de trempe uniforme en raison de sa géométrie complexe. De là sont apparues des modifications de la conception de la bobine d'induction et de nouveaux concepts d'utilisation de la fréquence dans le processus de trempe par induction. Les machines de trempe par induction ont connu de nombreux développements jusqu'à atteindre l'application de la trempe par induction sur la pièce en utilisant une double fréquence, soit de manière séquentielle, dans laquelle la MF puis la HF sont appliquées séquentiellement, concept appelé CDFP, soit de manière simultanée, où la MF et la HF sont appliquées en même temps, concept appelé CDFS.

Malgré les défis et les difficultés rencontrées par l'étude des éléments finis tridimensionnels dans la résolution du problème des couplages thermiques électromagnétiques, comme l'effort, les ressources et le temps de calcul long. Ce mémoire de maîtrise a présenté trois chapitres basés sur une étude numérique de la simulation d'un modèle d'éléments finis 3D pour la trempe par induction à une et double fréquences afin d'étudier et d'analyser l'application du traitement thermique en utilisant la trempe par induction séquentielle et simultanée à double fréquences sur une dent de pignon placée entre deux concentrateurs de flux ayant la même forme et géométrie de la dent du pignon. Ce travail vise également à étudier le comportement thermique et mécanique par la prédiction et l'évaluation de la distribution de la température pendant la trempe superficielle du pignon, en tenant compte des propriétés non linéaires du matériau.

Les objectifs de ce mémoire sont les suivants :

- La première recherche visait à fournir une analyse complète et exhaustive de l'impact de la trempe par induction séquentielle à double fréquence sur des structures géométriques complexes telles que les pignons en utilisant la simulation numérique. Cette recherche visait également à produire une distribution uniforme de la température autour du profil de la pièce durcie en utilisant la trempe par induction séquentielle à double fréquence, ainsi qu'à démontrer la différence entre la trempe par induction à double fréquence et à fréquence unique;

- L'objectif principal de la deuxième recherche, qui utilise le même modèle de trempe par induction séquentielle à double fréquence que la première recherche, est d'étudier la sensibilité du profil de dureté à la distribution de température finale via différents paramètres de processus en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) sur les données extraites des simulations, puis de déterminer la relation entre eux. La deuxième recherche a également pour but d'étudier l'influence de chaque paramètre sur la différence de température entre les quatre extrémités de la dent du pignon, ainsi que de développer des modèles puissants et robustes pour prédire la différence de température en utilisant la technique d'analyse de la variance, en plus de l'optimisation des paramètres du processus de trempe par induction basée sur la réduction de l'effet de bord;
- La troisième étude de recherche visait à créer un modèle 3D pour l'utilisation de la trempe par induction simultanée à double fréquence (CDFS) sur le pignon AISI 4340. Afin d'étudier ce que cette méthode apporte au processus de trempe par induction en termes de distribution de la température autour de la partie durcie du profil et son impact sur la diminution de l'effet de bord, ainsi que la différence entre les profondeurs de trempe autour du profil.

Pour atteindre ces objectifs, une stratégie de recherche organisée a été mise en œuvre en trois étapes sous la forme de trois études, comme détaillé dans les trois chapitres de ce mémoire. Ces trois études décrites dans ce mémoire ont également contribué à la réalisation des objectifs et des résultats escomptés. Tout se résume à ce qui suit :

- Dans la première étude, le modèle MEF 3D a été utilisé et les équations de champs électromagnétique et thermique ont été appliquées pour résoudre le problème du chauffage par induction afin de démontrer qu'un modèle de dureté uniforme ne pouvait pas être obtenu lors de l'application d'un durcissement par induction à fréquence unique en étudiant et en analysant le modèle lors de l'application du durcissement par induction en utilisant séparément MF et HF. Cela a été utile dans cette étude pour montrer la différence entre l'utilisation d'une fréquence unique et d'une double fréquence dans le processus de durcissement par induction.

Le modèle a ensuite été utilisé pour atteindre une température de référence à la fois au sommet et à la racine de la dent du pignon. Après cela, le modèle a été développé pour permettre l'application de la double fréquence dans le processus de durcissement de la dent de pignon. La distribution de la température autour du profil de dureté a été surveillée à l'aide d'une solution numérique au problème électromagnétique et thermique, et la température dans le temps à l'intérieur de la dent entière du pignon a été évaluée. Grâce à cela, les profondeurs de dureté le long des bords du sommet et de la racine de la dent ont été calculées, puis la profondeur durcie et la région de surchauffe affectée par le processus de chauffage ont été évaluées.

La première recherche a démontré qu'il est très difficile d'obtenir un schéma de trempe cohérent des dents de pignon en utilisant la trempe par induction à fréquence unique. La première étude a fourni un modèle MEF 3D comme outil puissant pour illustrer la flexibilité du contrôle de la distribution de la température finale autour du profil de dureté en utilisant la trempe par induction séquentielle à double fréquence. Grâce à ce modèle, nous avons pu ajuster les paramètres du processus pour atteindre trois niveaux de distribution de la température finale (maximum, moyen et minimum). La différence de température entre les extrémités du sommet et de la racine de la dent n'a pas dépassé 20 °C à chaque niveau, et c'est une indication qui a montré que l'effet de bord a été réduit par l'utilisation de la trempe par induction séquentielle à double fréquence. Parallèlement, les résultats de la distribution de la température autour du profil de dureté ont indiqué qu'un modèle de contour uniforme a été obtenu par cette approche, car la température du sommet et de la racine de la dent avait atteint la température austénitique sans qu'aucune partie de la dent ne fonde, avec une légère différence de température entre le bord et le milieu du sommet et de la racine de la dent. La première étude a également expliqué l'effet de l'application de la double fréquence sur le processus de durcissement par induction sur la profondeur de cémentation et la région de surchauffe de la dent de pignon durcie;

- Dans la deuxième étude, le modèle MEF 3D développé dans la première étude a été utilisé pour appliquer la trempe par induction à un pignon en utilisant la double fréquence séquentielle afin de mener une étude de la sensibilité du profil de dureté à travers différents paramètres du processus. Ceci est fait grâce à la réalisation de l'étude statistique ANOVA, qui a examiné l'influence et la contribution de chaque paramètre dans le processus de trempe par induction à double fréquence séquentielle sur la distribution finale de la température et la différence de température entre les extrémités du sommet et de la racine de la dent du pignon. Ces études statistiques ont également permis d'établir des modèles mathématiques pour prédire la température finale du profil de dureté et la différence de température entre les extrémités du sommet et de la racine de la dent. La robustesse de ces modèles a ensuite été testée à l'aide de divers critères d'adéquation statistique. Les graphiques RSM des paramètres les plus influents sur la différence de température ont été tracés par ANOVA. La recherche s'est ensuite terminée par la vérification des modèles mathématiques fournis par l'ANOVA en simulant les résultats des paramètres optimisés, qui ont également été réalisés par ANOVA, et en comparant les résultats de la simulation avec les résultats des modèles mathématiques.

La deuxième étude a réussi à utiliser le modèle 3D de la trempe par induction séquentielle à double fréquence dans l'étude des valeurs et des niveaux des paramètres optimaux auquel la différence de température la plus faible entre les bords du sommet et de la racine de la dent du pignon est atteinte. L'effet de l'écart axial (l'écart entre la dent principale et les concentrateurs de flux) sur la température finale qui a été menée dans cette étude, a montré que l'écart axial dans l'application de la MF affecte significativement la différence de température entre le sommet et la racine, tandis qu'il influence significativement la différence de température entre le bord et le milieu au sommet et à la racine de la dent dans l'application de la HF. Ensuite, les expériences de Taguchi ont été simulées et leurs résultats ont été exportés vers le logiciel Minitab v18 pour y appliquer des études statistiques. Cette étude a appliqué avec succès l'étude statistique ANOVA sur les résultats de simulation des modèles Taguchi afin de déterminer la contribution et l'influence des paramètres sur la température et la différence de température. Cette étude a révélé que le temps de chauffage HF est le paramètre le plus important et le plus influent sur la température au bord et au milieu du sommet. Par conséquent, les autres paramètres ne sont pas importants et la contribution la plus importante parmi les paramètres sur la température au bord et au milieu de la racine est la densité de courant MF. Parallèlement, le temps de chauffage de MF et HF ont une contribution et une influence pour quoi adéquates sur la température au bord et au milieu de la racine de la dent.

Cette étude a également montré que le paramètre le plus important influençant et contribuant à la différence de température entre les bords et le milieu du sommet et de la racine est le temps de chauffage MF. En outre, la densité de courant MF a une influence importante, mais le taux de contribution est plus faible sur cette différence. Quant aux autres paramètres, ils n'ont pas beaucoup d'influence sur la différence de température entre le sommet et la racine. Quant à la différence de température entre le bord et le milieu du sommet de la dent, il a été constaté que le paramètre le plus important et le plus influent est le temps de chauffage HF. Il a également été démontré que le paramètre qui contribue le plus à la différence de température entre le bord et le milieu de la racine de la dent est l'écart axial, et que le paramètre de temps de chauffage HF a influencé et contribué à cette différence, mais à un taux de contribution plus faible. Les graphiques de l'effet moyen des paramètres ont été extraits de l'ANOVA; ces résultats illustrent l'évaluation de l'influence et de la contribution de chaque paramètre du processus sur les températures aux quatre extrémités de la tête de la dent, ainsi que sur la différence de température entre les extrémités du sommet et de la racine. Ils reflètent également la nature de la relation qui existe entre eux. Ensuite, cette étude a pu extraire des modèles mathématiques pour prédire la température finale et la différence de température entre les extrémités de l'apex et de la racine de la dent du pignon. Ces modèles ont été testés au moyen des mesures d'adéquation R^2 , R^2_{adj} , R^2_{pred} , et S, et il est apparu clairement à partir des résultats de ces mesures que les modèles mathématiques sont suffisamment robustes et précis pour prédire la réponse à un niveau très proche des résultats simulés.

Finalement, dans cette étude, les graphiques de contour de la méthodologie de surface de réponse (RSM) des deux paramètres qui influencent le plus la différence de température entre les extrémités du sommet et de la racine ont été dessinés. La RSM donnée par l'analyse ANOVA est un moyen rapide et puissant de prédire la température finale en fonction des paramètres du processus. En conséquence, deux figures montrent l'effet des deux paramètres, soit le temps de chauffage MF et la densité de courant, sur la différence de température entre le sommet et la racine, à la fois sur le bord et au milieu de la dent. Deux autres figures illustrent l'effet des deux paramètres, le temps de chauffage HF et l'écart axial, sur la différence de température entre le bord et le milieu, tant au niveau du sommet que de la racine de la dent. Cette étude s'est terminée par la validation de ces modèles présentés par ANOVA en simulant les paramètres qui ont été optimisés par ANOVA et en comparant ensuite les résultats de la simulation avec les résultats des modèles mathématiques proposés pour la prédiction. Les résultats de simulation prouvent que les modèles mathématiques proposés sont des techniques précises et robustes pour prédire la différence de température sous différents ensembles de paramètres de contrôle, où les résultats de simulation montrent que l'erreur relative varie de 0,35% à 7,6% entre les résultats de simulation et les résultats des modèles mathématiques ANOVA;

- Dans la troisième étude, le modèle MEF 3D a été développé pour appliquer la trempe par induction simultanée à double fréquence à la dent de pignon. Cette étude poursuit l'approche suivie par la première étude, mais en utilisant la trempe par induction simultanée à double fréquence, où la température finale autour du profil de dureté a été surveillée et l'évolution de la température a été évaluée dans le temps. En plus, la température a été surveillée le long des extrémités du sommet et de la racine de la dent. Finalement, la profondeur durcie et la région de surchauffe de la zone affectée par le chauffage dû à la trempe par induction ont été déduites. La troisième étude a réalisé une grande avancée dans le monde de la simulation de la trempe par induction, car elle a réussi à développer le modèle MEF 3D afin de pouvoir appliquer la trempe par induction simultanée à double fréquence sur la pièce, c'est-à-dire appliquer le courant MF et le courant HF en même temps sur la même bobine d'induction. Cette étude a clarifié et étudié la distribution de la température autour du profil de dureté et les résultats ont démontré que la distribution de la température en utilisant le concept DFS était presque uniforme autour du profil de dureté. Cela a indiqué que l'effet de bord était négligeable pendant l'étude du gradient de température entre le bord et le milieu, mais également entre le sommet et la racine de la dent. Cette étude a évalué l'évolution de la température dans le temps le long des extrémités du sommet et de la racine de la dent. Elle a ainsi montré que la température au niveau du sommet et de la racine de la dent a évolué de manière régulière dans le temps avec un gradient qui converge avec l'augmentation de la température dans le temps. Cette étude s'est ensuite terminée par la déduction des profondeurs de dureté à partir du gradient de température le long des extrémités du sommet et de la racine de la dent, puis par l'évaluation de la profondeur de cémentation et de la région de surchauffe soumise au chauffage pendant la trempe.

Les trois études, qui constituent cette thèse, ont été réalisées dans les laboratoires d'ingénierie de l'UQAR et chacune d'entre elles a été présentée comme un document de recherche. Dans le but d'obtenir une connaissance complète et exhaustive de l'application de la trempe par induction à double fréquence à des composants mécaniques de formes géométriques compliquées (pignon) dans des conceptions séquentielles et simultanées. Ce mémoire a montré l'importance d'obtenir un contour uniforme du profil de dureté dans la trempe des pièces mécaniques par induction. Les trois études ont permis d'obtenir un contour uniforme du profil de dureté de la dent du pignon, ce qui n'aurait pas été possible en utilisant la trempe par induction à fréquence unique. Elles ont également permis d'expliquer l'application de deux concepts importants dans le monde de la trempe par induction, ce qui présage un avenir prometteur pour la technologie de la trempe par induction. Ce mémoire prédit un avenir brillant pour les simulations numériques et la modélisation de la trempe par induction, notamment en termes de compréhension du processus, d'évaluation des paramètres du processus et d'évaluation des effets sur la distribution de la température avant le processus. Ce mémoire a démontré que la modélisation de la méthode des éléments finis (MEF) pour les processus mécaniques avant de les appliquer à la réalité permet d'économiser une quantité importante de travail, de temps et d'argent par rapport aux procédures industrielles qui s'appuient sur les essais et les erreurs pour répondre aux exigences nécessaires. Actuellement, la simulation et la modélisation sont des sujets importants et fascinants pour les chercheurs et les ingénieurs, en particulier dans les processus de production, d'amélioration et de création de bobines inductives.

Ce mémoire a démontré, dans la troisième étude de recherche sur la trempe par induction simultanée à double fréquence, qu'une bobine d'induction peut chauffer instantanément l'engrenage en moins de 0,5 seconde, en appliquant deux fréquences simultanément sans aucun intervalle de temps. Ce résultat semble extrêmement prometteur en termes d'économie de temps et d'efforts tout en améliorant l'efficacité du processus d'induction. Ce mémoire explique davantage le degré de permittivité et de flexibilité lors de l'utilisation de la trempe par induction à double fréquence pour réguler la température et l'épaisseur de la couche de martensite autour du profil de dureté. Ceci permet de contrôler les caractéristiques des pièces à durcir par induction, en particulier leur dureté, leur résistance à l'usure et la fatigue de contact. Ces études ouvrent plusieurs domaines pour les études futures de la trempe par induction, y compris l'application expérimentale de ces études sur les machines de trempe par induction qui permettent l'application de la double fréquence, et la réalisation d'études statistiques pour améliorer les paramètres et prédire le profil de dureté de la pièce trempée par induction avec le concept de la double fréquence simultanée. Ces études peuvent inciter les chercheurs et les ingénieurs à l'avenir à comparer les études précédentes qui ont été faites en utilisant la trempe par induction à une seule fréquence avec les nouvelles études qui appliqueront la trempe par induction en utilisant la double fréquence. Enfin, cette approche appliquée dans les trois études n'est pas limitée aux pignons et engrenages, mais peut être appliquée à toutes les pièces mécaniques aux formes géométriques complexes qui sont difficiles à durcir en utilisant le chauffage par induction à fréquence unique.