

Le traitement thermique par induction : du générateur jusqu'à la trempe grâce à la simulation numérique

Victor Lejay, NTN-SNR Roulements et Julien Barlier, Transvalor S.A

Le chauffage par induction est utilisé pour la trempe des aciers. La simulation par éléments finis est un outil pour maîtriser le procédé multiphysique qu'est l'induction, avec un couplage entre les phénomènes électromagnétiques, thermomécaniques et métallurgiques. L'utilisation du code de calcul électromagnétique, intégré dans le logiciel Forge, est présentée dans cet article. Il permet une étude complète du procédé, depuis le générateur jusqu'aux résultats métallurgiques après trempe.

Le traitement thermique par induction est une alternative intéressante à d'autres procédés lorsqu'un changement local de microstructure est souhaité. C'est notamment le cas des dernières générations de bagues de roulements où le roulementier cherche à obtenir une dureté élevée au niveau des contacts billes-chemins, tout en conservant une ténacité suffisante sur les autres parties du produit. Un système de chauffe par induction est composé d'un générateur, un inducteur, la pièce à traiter et un système de trempe. Le développement d'un procédé industriel se déroule comme suivant :

1. Conception de l'inducteur et du système de trempe à partir de la simulation numérique ou à partir de précédents résultats expérimentaux.
2. Recherche d'un point de fonctionnement pour le générateur (consigne de courant ou de puissance, adaptation d'impédance et de fréquence).
3. Analyse des propriétés métallurgiques obtenues sur la pièce. Si le cahier des charges pour la pièce n'est pas respecté, alors il faudra itérer sur les étapes (1) et (2).

Le but de tout industriel est d'itérer le plus rapidement possible sur ces étapes afin

d'arriver dans le délai imparti à un procédé robuste et capable de répondre au cahier des charges métallurgiques du produit.

Ces trois étapes sont chronophages et reposent souvent sur une démarche essai et erreur. La simulation numérique est couramment utilisée à l'étape (1) mais est souvent manquante lors de la recherche du point de fonctionnement du générateur, étape (2) [1]. De nombreuses études montrent l'intérêt de la simulation par éléments finis pour comprendre ou prédire des phénomènes complexes, comme les déformations, les contraintes résiduelles ou les tapures de trempe [2-5]. Pour les industriels, les outils de simulation numérique doivent répondre aux contraintes suivantes :

- être suffisamment rapides pour réaliser toutes les itérations nécessaires dans le délai imparti ;
- être précis et prédictif, notamment pour la forme et la profondeur de la zone trempée ;
- être capables de décrire le procédé dans son ensemble, depuis le générateur jusqu'à la trempe, afin de simplifier les allers et retours entre la simulation et l'atelier de production.

Peu d'études se focalisent sur le lien entre le point de fonctionnement du générateur et les paramètres de la simulation. Les conditions aux limites, telles que le courant dans l'inducteur

ou le rendement de la chauffe, sont parfois ajustées pour que la simulation coïncide avec l'évolution de température mesurée ou la profondeur trempée [2, 3, 6]. Ces modèles sont peu adaptés aux besoins des industriels cherchant une simulation prédictive et ne négligeant pas le comportement du générateur. Inclure le circuit électrique du générateur dans la simulation permet de bénéficier d'un outil d'étude complet du procédé d'induction, et simplifie la corrélation expérience simulation.

Nous décrivons ici une nouvelle solution, intégrée dans le logiciel Forge®. Cette solution par éléments finis prend en compte le comportement du générateur, les couplages multiphysiques de la chauffe par induction, et leurs impacts sur l'évolution de température et les transformations métallurgiques [4]. Nous nous focaliserons sur la comparaison de simulations et de mesures expérimentales sur des bagues de roulements en acier C56.

Matériel et méthode Bagues de roulements

Les pièces étudiées sont des bagues extérieures de roulement en acier C56, forgées puis usinées avant traitement par induction. La composition chimique de cette nuance est visible dans le **tableau 1**. Ces bagues sont chauffées à des vitesses allant jusqu'à 200 °C/s. Les thermocouples ne sont pas adaptés pour la mesure avec de telles rampes de température due à leur temps de réponse trop important. Pour cette raison, la corrélation expérience simulation ne se fera pas sur la mesure de température, mais plutôt sur une comparaison précise du profil austénitisé puis

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Min	0.52	0.15	0.6	0	0	0	0	0	0
Max	0.6	0.35	0.9	0.03	0.01	0.2	0.1	0.2	0.04

TABLEAU 1 : Composition de l'acier C56 (en wt%).

trempe. La structure martensitique de ce profil est révélée après tronçonnage, polissage et attaque Nital.

Les points de transformations austénitiques Ac1 et Ac3 sont obtenus par essais dilatométriques pour des rampes de température allant de 2 °C/s à 400 °C/s, visibles sur la figure 1. Les essais dilatométriques sont réalisés sur différents lots matière d'acier C56 ce qui explique la dispersion observée. Les régressions de Ac1 et Ac3 en fonction de la vitesse de chauffe sont directement importées dans le fichier matériaux du logiciel Forge.

Les contraintes résiduelles après trempé sont obtenues par diffraction de rayons X. Les contraintes en sous-couche sont mesurées après enlèvement de matière par électroérosion. L'incertitude de mesure est de 100 Mpa et augmente avec la profondeur de matière retirée.

Dispositif expérimental

Les bagues étudiées ainsi que l'inducteur utilisés sont visibles sur la figure 2 (a). Des concentrateurs de champ sont positionnés dans cette zone. Avec la rotation de la bague, ce point froid est moyenné sur l'ensemble de la bague lors de la chauffe.

À des fins de simplifier la comparaison expérience simulation, la pièce ne sera pas mise en rotation lors de la chauffe. Ainsi l'effet des amenées de courant sera localisé, comme montré sur la figure 2 (b). Cette configuration sera ensuite comparée à une simulation d'un secteur de 45 degrés de la bague, permettant de retrouver la symétrie axiale de la bague.

La zone de coupe pour l'analyse métallographique est définie sur la figure 2 (a), à l'opposé des amenées de courant de manière à être comparable avec la simulation. Des mesures de dureté Vickers sont également réalisées sur ce plan.

Le coefficient d'échange thermique entre la bague et le fluide de trempé est estimé par analyse inverse d'une trempé selon la norme ISO 9950.

Le coefficient d'échange thermique entre la bague et le fluide de trempé est estimé par analyse inverse d'une trempé selon la norme ISO 9950.

Le coefficient d'échange thermique entre la bague et le fluide de trempé est estimé par analyse inverse d'une trempé selon la norme ISO 9950.

Caractérisation du générateur

Le générateur étudié ici est de type IGBT avec une puissance nominale de 200 kW. Le circuit électrique de l'installation comprend le générateur, un système d'adaptation d'impédance parallèle, l'inducteur et la bague à chauffer. Tous les composants peuvent se décomposer en résistances, inductances, condensateurs et transformateurs.

Deux types de pertes sont présents dans le circuit : les pertes résistives Rp dues à l'effet Joule et les pertes inductives Lp dues aux effets d'inductance mutuelle et à l'inductance de fuite du transformateur. Le circuit électrique est simplifié en ramenant toutes les pertes au circuit secondaire, comme visible sur la figure 3.

Le générateur fonctionne en consigne de puissance, et adapte donc le courant inducteur afin de maintenir une puissance active constante au niveau du générateur. Cependant, lors de la chauffe les propriétés électromagnétiques de la bague évoluent et modifient les valeurs de Li et Ri. En conséquence, la fréquence f et

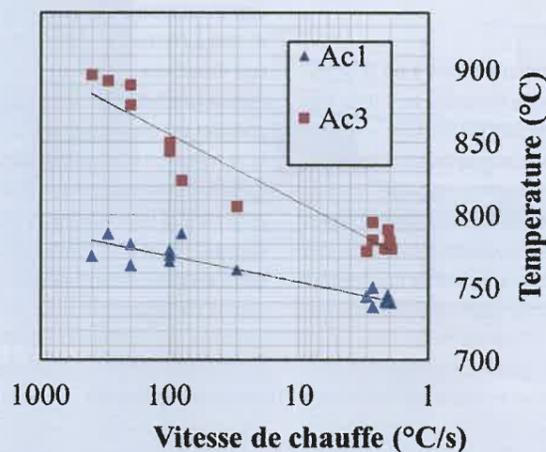


FIGURE 1 : Points de transformation austénitique Ac1 et Ac3 en fonction de la vitesse de chauffe, obtenus par mesures dilatométriques et importés dans le logiciel Forge.

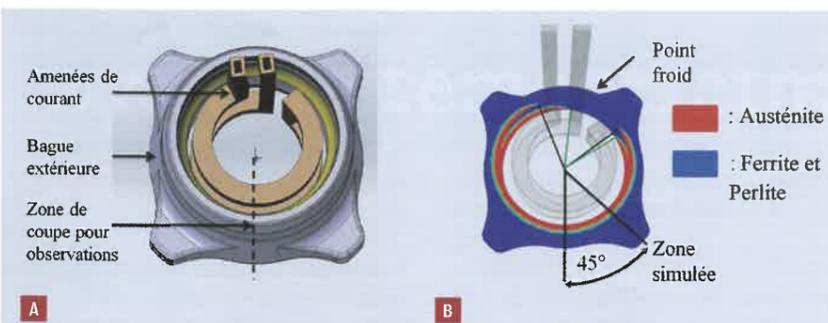


FIGURE 2 : Bague et inducteur étudiés (a). Les amenées de courant verticales de l'inducteur génèrent un point froid en fin de chauffe comme visible sur l'image (b) obtenue grâce à une simulation de chauffe statique.

le courant inducteur li varie même si la puissance active reste constante et égale à la consigne.

Le courant inducteur li n'est pas mesurable directement et est calculé par :

$$I_i = I_t \times K \quad (1)$$

Le tableau 2 donne les valeurs moyennes de chaque variable obtenue lors du cycle de chauffe. Lors des essais le rapport de transformation est fixé à K = 3,5 et la valeur des condensateurs à C = 38,71 µF.

Pour décrire complètement le générateur, il nous manque les valeurs de pertes Lp et Rp du circuit. Grâce aux valeurs du tableau 2 il est possible de calculer Leq et Req respectivement l'inductance et la résistance totale du circuit. Par la simulation numérique, nous obtenons les propriétés électromagnétiques de la pièce et de l'inducteur, soit Ri = 4375 µOhms et Li = 254 nH. Ensuite Lp et Rp sont déduits des équations (3) et (4).

$$Leq = L_i + L_p = f(K, f, C) \quad (3)$$

$$Req = R_p + R_i = f(Leq, C, U_g, I_g, f) \quad (4)$$

Ainsi le circuit électrique est complètement décrit, et les valeurs de K, C, Lp et Rp sont utilisés comme données d'entrées de la simulation (tableau 3). Les valeurs de pertes calculées sont propres au circuit du générateur et peuvent être utilisées pour d'autres pièces et inducteurs.

Modélisation du générateur

Le comportement du générateur est modélisé à partir des valeurs du tableau 3. La figure 4 présente le fonctionnement de l'algorithme itératif permettant de calculer f et li afin de maintenir une puissance constante Pg égale à la consigne. Ug et Ig sont ensuite obtenus par post-traitement.

Simulation numérique de la chauffe par induction Couplage multiphysique

Lors de la chauffe par induction, les phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques et métallurgiques sont couplés. La solution numérique repose sur deux solveurs : le premier résout les équations électromagnétiques et calcule la densité de puissance créée dans la pièce par les courants induits. Le deuxième résout de manière couplée les équations thermiques-mécaniques-métallurgiques. Ces deux solveurs sont couplés tous

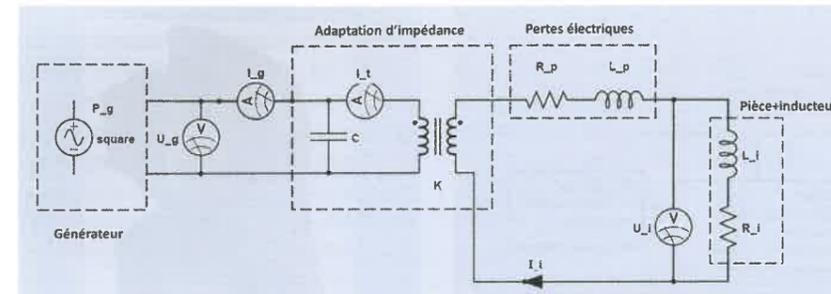


FIGURE 3 : Circuit électrique simplifié de l'installation.

Pg	102 [kW]
Ug (RMS)	401 [V]
Ui (RMS)	93 [V]
Ig (RMS)	258 [A]
It (RMS)	1245 [A]
f	13020 [Hz]

TABLEAU 2 : Mesures expérimentales moyennes lors du cycle de chauffe.

Pg	102 [kW]
K	3.5
C	38.71 [µF]
Rp	963 [µW]
Lp	61 [nH]

TABLEAU 3 : Paramètres utilisés dans le solveur électromagnétique Forge pour simuler le générateur industriel.

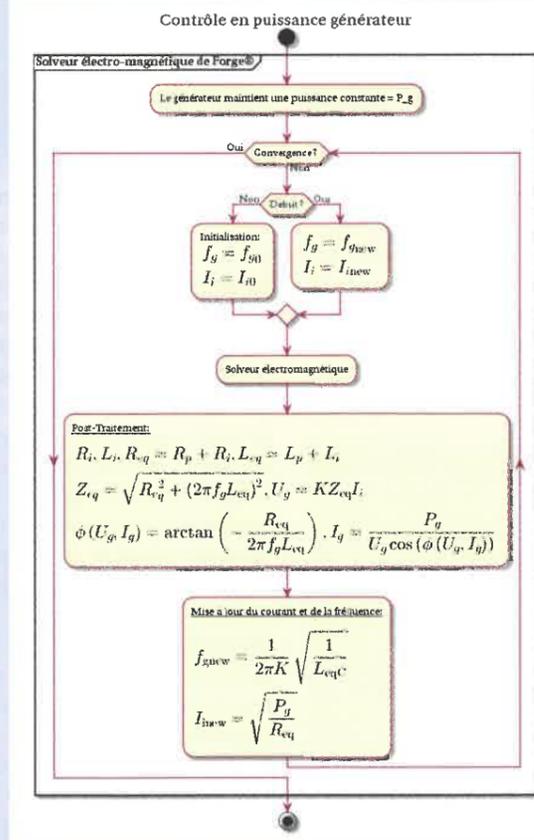


FIGURE 4 : Synoptique de fonctionnement de l'algorithme simulant le générateur.

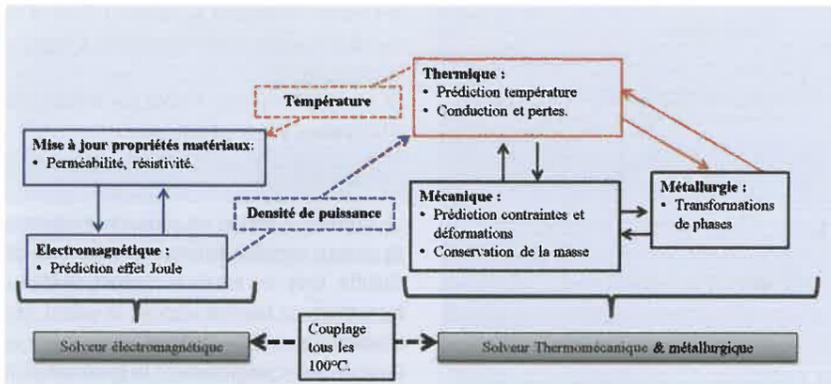


FIGURE 5 : Couplage des phénomènes physiques durant la simulation de chauffe par induction avec le logiciel Forge®.

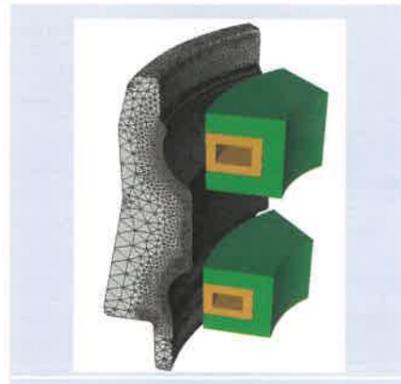


FIGURE 6 : La simulation repose sur un maillage tétraédrique. Des plans de symétrie sont appliqués sur un secteur de 45 degrés.

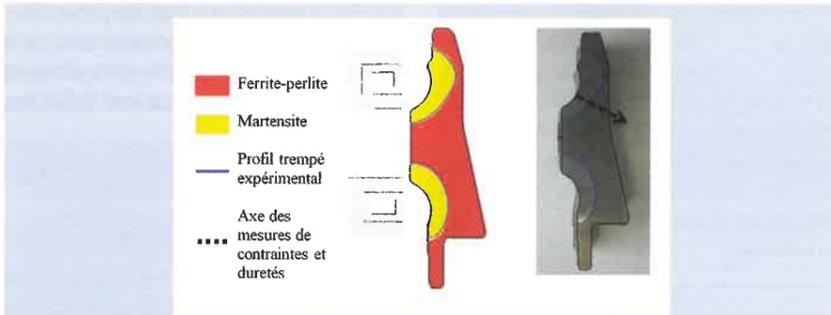


FIGURE 7 : Comparaison du profil trempé prédit par la simulation et obtenu expérimentalement.

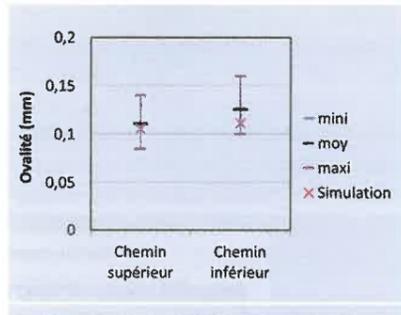


FIGURE 8 : Comparaison entre la déformation après trempe prédite par la simulation et mesurée sur 30 pièces.

les 100 °C afin de mettre à jour les propriétés électromagnétiques de la bague en fonction de la température. Pour plus de détails voir [4]. La résolution de problèmes multiphysiques fait appel à des données matériaux multiphysiques. Dans notre cas, il est nécessaire d'obtenir les données thermomécaniques, métallurgiques et électromagnétiques pour l'acier

C56 ainsi que les propriétés électromagnétiques de l'inducteur et des concentrateurs.

Mise en donnée

Le maillage du secteur utilisé pour la simulation est visible sur la figure 6. Les plans de symétrie positionnés à 45 degrés permettent de réduire le temps de calcul tout

en conservant une description complète de la pièce.

Résultats

Comparaison des profils trempés

La figure 7 montre la répartition des phases prédites par la simulation ainsi que le profil trempé observé sur la bague. On note que la simulation est en accord avec l'expérimental tant sur la profondeur trempée que sur la forme du profil. Cette corrélation est un prérequis avant de pouvoir étudier d'autres résultats comme les contraintes ou le point de fonctionnement du générateur.

Déformations

Un aspect qui a toujours intéressé les roulementiers est la déformation des produits au traitement thermique, notamment l'ovalité qui est la différence entre le diamètre maximum et le diamètre minimum mesuré sur les chemins du roulement. Sur la figure 8 nous pouvons remarquer que l'ovalité prédite par la simulation après trempe est très proche de l'ovalité mesurée sur 30 pièces.

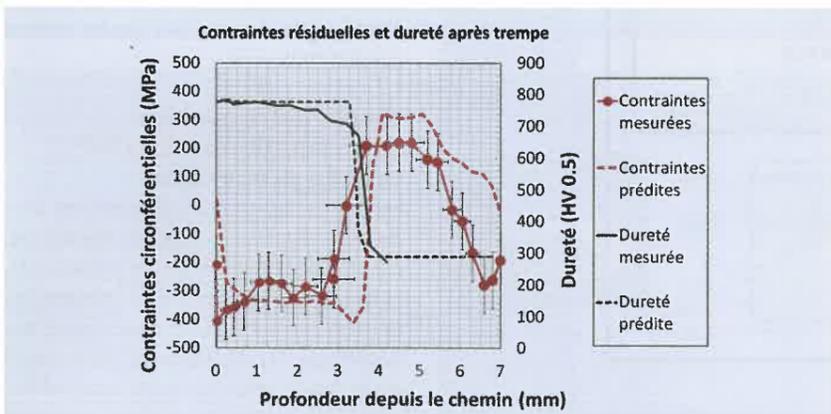


FIGURE 9 : Comparaison du profil de dureté et des contraintes circonférentielles après trempe en fonction de la profondeur.

Résultats métallurgiques

Les contraintes de trempe et la dureté sont mesurées en profondeur et comparés aux résultats de la simulation. La dureté prédite est conforme avec le profil de dureté mesuré, comme visible sur la figure 9. Les contraintes circonférentielles après trempe corréleront également avec les mesures expérimentales, tout en sachant que l'incertitude pour ce type de mesure est grande.

Prédiction du comportement du générateur

L'intégration du générateur dans la simulation permet de comparer le point de fonctionnement simulé avec le point de fonctionnement expérimental. Comme visible sur la figure 8, la modélisation du générateur permet de calculer le courant et la fréquence de l'inducteur. Jusqu'à trois secondes de chauffe on observe une bonne corrélation entre les grandeurs prédites et mesurées. Après trois secondes, les courbes simulées suivent la même tendance que les courbes expérimentales mais de manière exagérée.

Discussion

L'intégration du générateur dans le code de calcul simplifie la comparaison entre simulation et expérience. Les allers retours entre la simulation et la machine industrielle deviennent aisés puisque le générateur et la mise en donnée sont pilotés de la même manière. Il n'est plus nécessaire de recourir à un calcul complexe pour passer de la consigne de puissance au courant circulant dans l'inducteur.

Les points d'inflexion visibles sur les courbes de la figure 8 s'expliquent par l'augmentation de la résistivité de la pièce ainsi que le passage

du point de Curie. L'écart grandissant entre les courbes mesurées et simulées au cours de la chauffe peut s'expliquer par une mauvaise estimation de Li et de Ri à haute température. Une autre explication serait que les pertes résistives et inductives du circuit ne soient pas constantes mais évoluent lors du cycle dû à un échauffement des divers composants du circuit.

Quoi qu'il en soit, ces courbes permettent de placer le point de fonctionnement du générateur dans son diagramme d'impédance (figure 10). Le générateur ne pourra démarrer que si son point de fonctionnement se situe dans les limites du diagramme. De plus un point de fonctionnement décalé par rapport à la bissectrice de l'impédance caractéristique du générateur empêchera le générateur de délivrer sa puissance maximale : en effet le générateur arrivera en limitation de courant ou de tension avant d'atteindre son maximum de puissance. Le point de fonctionnement est en réalité une ligne due à l'évolution des propriétés électromagnétiques de la pièce lors de la chauffe.

En vue d'optimiser le procédé, l'industriel cherchera un point de fonctionnement le plus proche de la droite d'impédance caractéristique tout en ayant la fréquence souhaitée. Si tel n'est pas le cas, il faudra modifier l'adaptation d'impédance grâce aux condensateurs C et au transformateur K. Le logiciel Forge®, en permettant de prédire le point de fonctionnement, peut aider l'industriel dans cette démarche. Ici nous avons comparé la simulation à un essai statique et sans rotation de la bague par rapport à l'inducteur. Mais l'industriel sera plus intéressé par une comparaison avec le procédé réel en rotation, incluant l'asymétrie de

« L'industriel cherchera un point de fonctionnement le plus proche de la droite d'impédance caractéristique tout en ayant la fréquence souhaitée. »

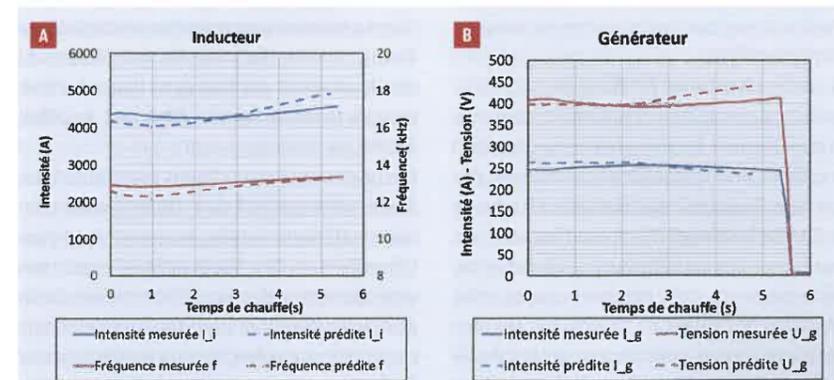
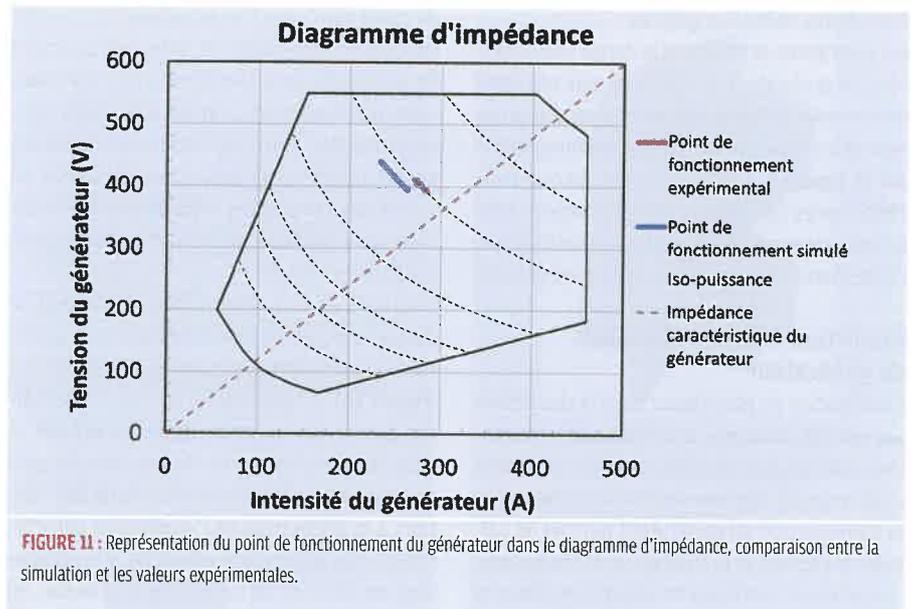


FIGURE 10 : Évolution des valeurs mesurées et simulées du courant inducteur Ii et de la fréquence (a), du courant générateur Ig et de la tension du générateur Ug (b) au cours de la chauffe.



Bibliographie

- [1] Garcia, Hernandez et Ospina, *Modeling of Coil Design for Induction Hardening in an Automotive Spindle Axle*, chez International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation, Orlando, 2014.
- [2] Horino, Ikuta, Arimoto, Jin et Tamura, *Explanation on Origin of Distortion in Induction Hardened Ring Specimens by Computer Simulation*, International Conference on Distortion Engineerings, Bremen, 2005.
- [3] Schwenk, Straus, Hoffmeister et Schulze, *Numerical modelling of induction surface hardening and its contribution to distortion reduction*, Bremen, 2011.
- [4] Bay, Barlier, Sourmail, D. Cagny, Courteaux, Paya, Denand, Esin, Teixeira, Aebly-Gautier, Denis, Dehmas et Geandier, *Modelling distortions in induction heat treatment processes*, chez International Conference on Distortion Engineering, Bremen, 2015.
- [5] Horino, Inoue, Ikuta et Kawasaki, *Explanation by computer simulation about quenching crack generation in induction hardening process of cylindrical specimens with a ring groove*, chez International Conference on Distortion Engineering, Bremen, 2011.
- [6] Yuan, Kang, Rong et Sisson, *Finite Element Analysis of Induction Hardening Process*, IFHTSE proceedings, Indianapolis, 2003.
- [7] M. Fisk, *Validation of induction heating model for Inconel 718 components*, Lulea University of Technology: Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, 2008.

l'inducteur. Dans ce cas il est nécessaire de revenir à une simulation sans plans de symétrie, avec mouvements bague inducteur ce qui augmente fortement le temps de calcul. Cependant des astuces permettent de revenir à des temps de calcul acceptables, moyennant adaptation des conditions aux limites de la simulation. Ainsi il est possible d'obtenir des résultats conformes au cycle industriel dans un délai raisonnable. L'utilisateur peut alors réaliser plusieurs itérations de calcul dans une journée, ce qui devient compatible avec les délais demandés pour la définition des outillages.

Enfin, la corrélation obtenue tant sur le plan métallurgique avec le profil trempé, que sur les contraintes ou les déformations, est la preuve que la simulation numérique est un outil utile pour l'optimisation du procédé de trempe par induction.

Perspectives

Plusieurs pistes sont à l'étude pour améliorer l'outil de simulation. La première concerne l'auto-induction. Ce phénomène n'est pas pris en compte, en conséquence la densité de courant dans l'inducteur est constante à travers la section de la spire et n'est pas influencée par la présence des concentrateurs ou de la bague. Des travaux en cours montrent que la prise en compte de l'auto-induction dans Forge permet d'améliorer la prédiction du profil trempé dans certaines configurations (inducteur dans une gorge par exemple).

D'autres améliorations possibles concernent l'optimisation du temps de calcul afin d'obtenir

des modèles 3D, sans plans de symétries et avec mouvements pièces inducteurs, compatibles avec les échéances industrielles.

Conclusions

La solution Forge® est prédictive car les paramètres du générateur sont utilisés tels quels comme données d'entrées dans la simulation pour prédire les propriétés métallurgiques de la pièce. En s'affranchissant des conditions aux limites de l'inducteur (courant et fréquence), la simulation est pilotée comme le générateur et facilite les développements industriels. Sur une application de bagues de roulements en acier C56, les propriétés métallurgiques comme la microstructure, la dureté ou les contraintes résiduelles prédites par la simulation corrélent aux mesures expérimentales. De plus le point de fonctionnement du générateur est correctement prédit par la simulation. La solution proposée dans cet article est donc utile pour optimiser les trois étapes du développement décrites dans l'introduction, puisque le même logiciel est utilisé du début à la fin du développement.

En conclusion, les conditions pour l'obtention d'un modèle prédictif sont : l'utilisation de données matériaux fiables, le respect des hypothèses liées au procédé et enfin le respect des contraintes du calcul par éléments finis (taille de mailles, conditions aux limites). Seule une corrélation approfondie entre la simulation et l'expérimental peut permettre aux industriels de valider leurs données matériaux et d'utiliser avec confiance un code de calcul pour optimiser leurs procédés.