

Résilience de l'Impact de Différents Types du Traitement Laser des Aciers Electriques à Grains-Orientés après Recuit.

M. Nesser^a, O. Maloberti^a, C. Pineau^b, J. Dupuy^c, J-P. Birat^d, J. Fortin^e

^aSYMADE, UNILASALLE Amiens, 14 quai de la Somme, Amiens, 80080, France

^bIRT-M2P, 4 rue Augustin Fresnel, Metz, 57070, France

^cMultitel a.s.b.l., 2 Rue Pierre et Marie Curie Parc Initialis, Mons, 7000, Belgique

^dIF Steelman, 5 rue du Gate-Chaux, 57280, Semecourt, France

^eLaboratoire LTI, IUT d'Amiens Avenue des Facultés, Amiens, 80025, France

RESUME - Comprendre le mécanisme du traitement laser sur les aciers électriques à grains orientés est essentiel pour optimiser les paramètres du processus et améliorer les performances de ces matériaux dans les cœurs des machines électriques. Dans cette étude, nous avons examiné les effets de différentes durées d'impulsion laser sur les propriétés magnétiques des aciers électriques à grains orientés (GOES), en particulier les pertes totales. Nous avons identifié trois types d'interactions entre le laser et la matière, qui dépendent de la durée de l'impulsion : un en utilisant un laser à ultra-courte impulsion, principalement axé sur l'effet d'ablation. Ensuite, avec des durées d'impulsion longues, nous avons constaté principalement un effet thermique résultant de l'irradiation laser. Enfin, avec des durées d'impulsion courtes, nous avons observé principalement un effet de gravure sur la surface de l'échantillon. En étudiant la résilience des impacts laser en fonction de la température de recuit, nous avons pu évaluer l'impact de chaque durée d'impulsion laser sur les propriétés magnétiques des aciers électriques à grains orientés. Nous avons constaté que les lasers à ultra-courte impulsion avaient un effet persistant de réduction des pertes et de raffinement des domaines, même après un recuit à une température élevée de 800 °C. En revanche, les lasers à durée d'impulsion longue et courte ont montré une réduction des pertes, mais cette réduction a disparu après un recuit à 600 °C. Ces résultats soulignent l'importance de choisir la durée d'impulsion appropriée lors du traitement laser des aciers électriques à grains orientés afin d'optimiser leurs performances magnétiques. En comprenant les mécanismes de ces interactions laser-matière, nous sommes en mesure d'adapter les paramètres du processus pour obtenir des améliorations significatives dans les propriétés magnétiques de ces matériaux essentiels pour les applications dans les machines électriques.

Mots-clés— *Aciers électriques, Grains Orientés, Laser pulsé, Traitement de surface, Pertes fer, Recuit.*

1. INTRODUCTION

Le traitement laser des tôles d'aciers électriques à grains-orientés est une technique qui s'est avérée efficace pour le raffinement des domaines magnétiques, entraînant ensuite une réduction des pertes fer [1].

Une étude de l'effet du laser pulsé sur les pertes en fer a conclu à une réduction de 16% à une induction de 1,5 T pour une fréquence de 50 Hz. Ce traitement a été effectué sur un acier Fe-3%Si à grains orientés de dimensions 30 mm x 80 mm et d'une épaisseur de 0,28 mm [2]. Le traitement de surface par un laser à fibre pulsé avec une longueur d'onde de 1064 nm et une durée d'impulsion comprise entre 50 µs et 500 µs sur des aciers Fe-3.2Si à grains orientés électriques et d'épaisseur 0,35 mm a prouvé une diminution de la largeur du domaine magnétique en fonction du nombre d'impulsions laser pour un optimum de 10 impulsions pour une énergie de 0,6 mJ par impulsion [3].

Dans une étude précédente, nous avons présenté la corrélation entre la durée de l'impulsion laser choisie lors du processus de traitement de surface et les performances des propriétés magnétiques du matériau. Nous avons prouvé l'avantage d'une impulsion ultra-courte pour un raffinement optimal des domaines et en conséquence pour une réduction des pertes. Cette réduction a atteint 13% pour l'induction 1,5T à une fréquence de 50 Hz et 38% à 0,5T pour la même fréquence [4].

L'analyse réalisée porte sur l'effet du traitement laser sur la surface de l'échantillon, ainsi que sur les coefficients des composantes d'hystérésis et des pertes dynamiques. Cette analyse a permis de distinguer trois types d'effets liés à la durée de l'impulsion du laser : l'effet thermique, l'effet de gravure et l'effet de gravure par sublimation ou ablation [4]. Lorsqu'un traitement laser est effectué avec une longue durée d'impulsion, généralement de l'ordre d'une centaine de nanosecondes, l'effet principal est thermique. Cela signifie que l'énergie du laser est principalement convertie en chaleur, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'échantillon. Dans ce cas, on parle d'irradiation laser. L'effet thermique peut induire des modifications dans l'état des contraintes résiduelles locales.

En revanche, lorsque la durée de l'impulsion est courte, l'effet thermique est plus intense. Cela peut conduire à une légère gravure dans la profondeur du matériau, ce qui est désigné comme un effet de gravure. En d'autres termes, le laser érode légèrement la surface de l'échantillon, créant ainsi une sorte de gravure. Cette gravure peut agir comme un bord artificiel entre les grains du matériau, ce qui peut augmenter

l'énergie totale d'un domaine magnétique et entraîner sa multiplication pour maintenir l'équilibre du système.

Enfin, lorsque des impulsions laser ultra-courtes sont utilisées, la durée est si brève que le matériau subit une sublimation. Cela signifie qu'il y a une évaporation directe de la matière sans passer par l'état liquide. Ce processus se traduit par des gravures nettes de quelques micromètres de profondeur, et on appelle cela l'effet d'ablation [7]. Pour vérifier ces hypothèses, l'étude présentée dans l'article se concentre sur le comportement des pertes dans des tôles traitées par laser après un recuit, ce qui permet la relaxation des contraintes. L'objectif est d'évaluer la résilience de l'impact de chaque type de traitement laser en fonction de la température. Ainsi, en étudiant les pertes dans les tôles traitées, il est possible d'analyser les effets spécifiques de chaque type de traitement laser et de comprendre comment ils influencent les propriétés magnétiques et les contraintes résiduelles locales.

2. PROCEDURES EXPERIMENTALES

Le traitement de surface des échantillons a été réalisé en utilisant deux équipements laser différents, fonctionnant avec des durées d'impulsions de différentes échelles. Le premier équipement est un laser à fibre pulsé IPG fonctionnant à une longueur d'onde de 1,064 μm et avec une durée d'impulsion variant de 4 ns à 200 ns. Le deuxième équipement utilise une longueur d'onde de 1,030 μm et des impulsions d'une largeur comprise entre quelques centaines de femtosecondes et 10 picosecondes (voir Table 1).

Trois échantillons ont été traités en utilisant les configurations laser optimisées respectivement pour une durée d'impulsion longue (effet de radiation), une durée d'impulsion courte (effet de gravure) et une durée d'impulsion ultra-courte (effet d'ablation). Ces traitements ont été effectués pour observer les effets spécifiques de chaque type de traitement laser.

Effet	Longueur d'onde	Durée d'impulsion
Irradiation (Impulsion longue)	1.064 μm	100 ns – 200 ns
Gravure (Impulsion courte)	1.064 μm	4 ns – 30 ns
Ablation (Impulsion ultra-courte)	1.03 μm	500 fs – 10 ps

Table 1. Caractéristiques des différents lasers

Par la suite, pour déterminer la température de rétention de l'impact laser, un traitement thermique a été effectué. Les échantillons ont été soumis à un traitement thermique à une température de 350 $^{\circ}\text{C}$ pendant 10 minutes, sous une atmosphère contrôlée d'argon (un gaz inerte) pour éviter toute corrosion. Les échantillons ont été ensuite refroidis lentement dans le four afin de minimiser l'introduction de contraintes thermiques. Ce processus de recuit a été répété 9 fois, en augmentant la température de 50 $^{\circ}\text{C}$ à chaque étape.

Les valeurs des pertes ont été mesurées à l'aide d'un dispositif appelé Single Sheet Tester (SST) entre chaque étape de recuit. Le fonctionnement du SST repose sur la mesure de la densité de flux magnétique et de la correspondante intensité de champ magnétique dans la tôle en acier testée. Pour mesurer les

propriétés magnétiques, un champ magnétique est appliqué à la tôle à l'aide d'une bobine entourant le noyau. Cette bobine est connectée à une source de courant, qui génère un courant contrôlé produisant la force magnétique désirée. Lorsque le champ magnétique est appliqué, le flux magnétique est induit dans la feuille, et sa densité est mesurée à l'aide du bobinage secondaire. Le flux magnétique à l'entrefer est compensé directement par le logiciel. Les mesures de densité de flux magnétique obtenues à partir du SST sont ensuite utilisées pour calculer divers paramètres magnétiques, tels que la perméabilité magnétique, la boucle d'hystérésis et les pertes Fer de la tôle.

3. LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'interaction entre le laser et la matière varie considérablement en fonction de la durée de l'impulsion laser utilisée. Lorsqu'une impulsion ultra-courte est utilisée, typiquement dans la plage des femtosecondes, l'énergie du laser est transmise au matériau en un laps de temps extrêmement court. Cette déposition d'énergie très rapide crée une interaction intense et localisée avec la matière, ce qui se traduit par une « ablation » (élimination) du matériau et la formation de plasma.

Cependant, l'impulsion ultra-courte est si brève que le matériau n'a pas suffisamment de temps pour se chauffer et se diffuser thermiquement, mais subit plutôt des processus de vaporisation et d'éjection de matière. Ainsi, lorsqu'une impulsion courte est utilisée, avec une durée de quelques nanosecondes, il y a une accumulation de chaleur dans le matériau et une diffusion thermique à l'intérieur de celui-ci. Cette accumulation de chaleur conduit à une gravure thermique du matériau sur une profondeur de quelques micromètres. L'impulsion courte permet au matériau de subir une légère « gravure » en surface en raison de l'effet thermique intense, mais sans atteindre les niveaux d'ablation observés avec une impulsion ultra-courte.

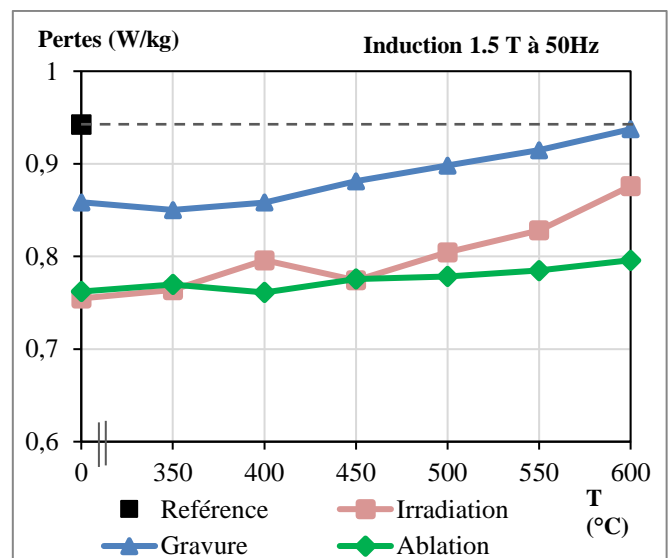


Fig. 1. Valeurs des Pertes par kg en fonction de la température de recuit pour les trois types d'effet laser (Chaque recuit est effectué pendant 10 minutes).

Enfin, lorsqu'une impulsion longue est utilisée, d'une durée de plusieurs centaines de nanosecondes, il y a un transfert d'énergie efficace vers le matériau. Cette durée plus longue permet au matériau de se chauffer suffisamment pour atteindre des températures élevées, entraînant des processus tels que la

fusion, la vaporisation et les changements de phase. Cependant, l'impulsion longue ne provoque pas une gravure significative du matériau, car l'énergie est principalement utilisée pour les processus de fusion et de vaporisation plutôt que pour l'ablation donc il s'agit d'un effet « irradiation » principalement.

Le traitement laser avec une durée d'impulsion longue, qui génère principalement un effet de radiation, a montré une réduction des pertes magnétiques de 0.94 W/kg à 0.75 W/kg. Cependant, cette réduction des pertes a disparue après un recuit à une température de 550°C pendant 10 minutes.

En revanche, pour le cas du traitement laser avec une durée d'impulsion ultra-courte, qui présente principalement un effet d'ablation, il y a eu une réduction des pertes magnétiques du 0.94 W/kg à 0.76 W/kg. Même après un recuit à une température élevée de 760°C, la réduction des pertes magnétiques était conservée. Une légère augmentation des pertes de puissance à 0,79 W/kg a été mesurée. Cela signifie que l'effet d'ablation induit par le traitement laser à impulsions ultra-courtes a permis une modification durable de la structure magnétique du matériau, même à des températures de recuit élevées donc il ne s'agit pas plus d'un effet basé sur la création des contraintes thermiques locales.

Finalement, l'effet de gravure résultant d'un laser à durée d'impulsion courte a entraîné une légère réduction des pertes, passant de 0,94 W/kg à 0,85 W/kg qui a disparu après le recuit à 600°C.

Au cours du processus d'irradiation laser, l'énergie reçue par l'échantillon est utilisée pour chauffer la surface, générant ainsi des contraintes thermiques qui peuvent modifier l'état énergétique des domaines magnétiques, en particulier l'énergie magnéto élastique. Ainsi, pour minimiser leurs énergies, certains domaines de fermeture désorientés peuvent être générés et en même temps, les domaines sont raffinés. La contrainte thermique induite et les domaines de fermeture désorientés autour des points laser peuvent avoir un impact sur les pertes d'hystérésis quasi-statiques et le raffinement des domaines principaux contribue à la réduction des pertes dynamiques [8].

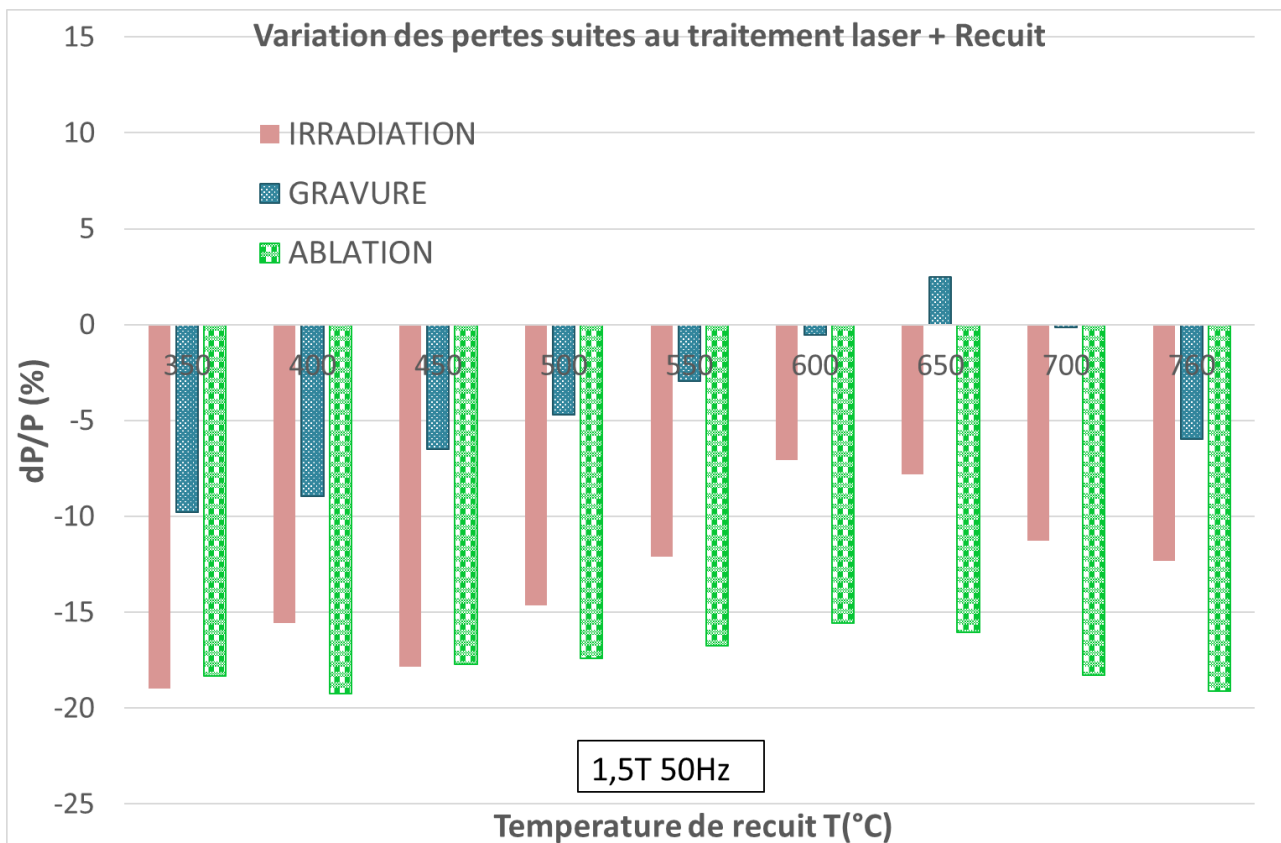


Fig. 2. Pourcentages de reduction des Pertes en fonction de la température de recuit pour les trois types d'effet laser (Chaque recuit est effectué pendant 10 minutes).

Après le recuit, l'effet du traitement laser de l'acier était supprimé, ceci est dû à la relaxation des contraintes de compression dans les zones de traitement au laser. Cela implique que la structure originale des grands domaines magnétiques qui existait avant le traitement au laser est restaurée. Alors que le processus d'ablation qui a montré la température de rétention la plus élevée ; réduction des pertes de 19% conservée après recuit à 760°C) (voir Figure 2).

Ceci implique que les mécanismes de raffinement des domaines et de mobilité des parois sont dissemblables ou moins dépendantes de ceux liés aux effets de la contrainte thermique. Ainsi, dans la figure 2, nous observons que la réduction des pertes de 19% conservée après recuit à 760°C) (voir Figure 2). D'où les mécanismes de raffinement des domaines et de mobilité des parois sont dissemblables ou moins dépendantes de ceux liés aux effets de la contrainte thermique. D'après les résultats présentés dans la figure 2, nous remarquons que la réduction des pertes se rétablissait après un recuit à 700 °C, de 12% le cas d'irradiation et à 6% en cas de la gravure laser. Cela suggère que cette récupération des pertes n'est pas due uniquement à la relaxation des contraintes locales induites par le traitement laser, mais plutôt à une relaxation globale des contraintes dans la tôle à cette température élevée.

4. CONCLUSIONS

Une étude a été menée pour examiner les variations des pertes magnétiques dans un échantillon d'acier Fe-(3wt%)Si à grains orientés, en fonction des effets laser et de la température de recuit, dans une plage allant de 350°C à 760°C pendant 10 minutes sous atmosphère contrôlée. Les résultats ont démontré que le recuit à une température de 600°C pendant 10 minutes permet d'éliminer les effets du traitement laser avec une longue durée d'impulsion, ainsi qu'avec une courte durée d'impulsion, en termes de réduction des pertes magnétiques.

Cependant, il a été constaté que l'effet de l'ablation laser avec une durée d'impulsion ultra-courte reste résilient même après le recuit à 760°C. Cela signifie que malgré le traitement thermique, l'effet de l'ablation persiste et la réduction des pertes est maintenu.

5. REMERCIEMENTS

Cette recherche a été rendue possible grâce au financement accordé par le Conseil européen de la recherche (ERC) dans le cadre du programme H2020-IND-CE-2016-17/H2020-FOF-2017 (numéro de contrat 766437).

6. REFERENCES

- [1] T. Iuchi et al., Journal of Applied Physics, vol. 53, p. 2410, 1982. DOI: 10.1063/1.330828.
- [2] I. Petryshynets et al., AIP Adv., vol. 8, no 4, p. 047604, 2018. DOI: 10.1063/1.4994191.
- [3] V. Puchy et al., Acta Phys. Pol. A, vol. 131, pp. 1445 1449, 2017. DOI: 10.12693/APhysPolA.131.1445.

[4] M. Nesser et al., Journal of Mag. And Mag. Materials, Vol. 504, p. 166696, 2020. DOI : 10.1016/j.jmmm.2020.166696

[5] M. Nesser et al., IEEE Trans. on Mag., Vol. 58, I. 8, 2022. DOI : 10.1109/TMAG.2022.3152899.

[6] O. Maloberti et al., Journal of Mag. And Mag. Materials, Vol. 566, p. 170248, 2023. DOI : 10.1016/j.jmmm.2022.170248.

[7] J. Dupuy et al., SPIE, High-Power Laser Mat. Proc.: App. Diag. and Sys.VIII, Vol. 10911, p.1091104, 2019. DOI: 10.1117/12.2505326.

[8] R. Lemaître et T. Belgrand, Tech. Ingénieure, vol. D2124 v1, 2014. DOI : 10.51257/a-v1-d21