



HAL
open science

Developpement d'un dispositif de mise en contraintes résiduelles par impulsion électromagnétique

Aurélien Chazottes-Leconte, Emmanuel Sonde, Thibaut Chaise, Charles Joubert, Hubert Razik, Laurent Morel, Daniel Nelias

► To cite this version:

Aurélien Chazottes-Leconte, Emmanuel Sonde, Thibaut Chaise, Charles Joubert, Hubert Razik, et al.. Developpement d'un dispositif de mise en contraintes résiduelles par impulsion électromagnétique. Symposium de Génie Electrique (SGE'18), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981840

HAL Id: hal-02981840

<https://hal.science/hal-02981840v1>

Submitted on 28 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement d'un dispositif de mise en compression de surface par impulsion électromagnétique

Aurélien Chazottes-Leconte¹, Emmanuel Sonde², Thibaut Chaise², Laurent Morel¹, Charles Jourbert¹, Daniel Nelias², Hubert Razik¹.

¹Univ Lyon, UCB Lyon 1, CNRS UMR5005, Ampère, Villeurbanne, 69622, France.

²Univ Lyon, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, LaMCoS, Villeurbanne, 69621, France.

RESUME – Les procédés de mise en compression de surface sont utilisés dans l'industrie pour améliorer les performances des parties les plus sollicitées de pièces mécaniques. Les procédés actuels, comme le grenailage et le galetage, sont limités à des profondeurs de traitement assez faibles de l'ordre du millimètre. Une nouvelle technique basée sur les impulsions électromagnétiques est à l'étude. D'après les études théoriques menées jusqu'à présent sur ce procédé, il est possible d'atteindre des profondeurs d'une dizaine de millimètres. Pour valider ces hypothèses, un prototype basé sur un générateur d'impulsions de courant, a été dimensionné et est en cours de développement. Des tests préliminaires ont été réalisés avec le dispositif seul ainsi qu'avec des éprouvettes de différents matériaux.

Mots-clés—*Procédé électromagnétique ; contraintes résiduelles ; générateur d'impulsions électromagnétiques ; générateur d'impulsions de courant.*

1. INTRODUCTION

Les procédés de mise en compression de surfaces sont utilisés industriellement pour générer des contraintes résiduelles de compression dans les zones les plus sollicitées de pièces mécaniques. Correctement appliquées, ces contraintes permettent d'augmenter considérablement la durée de vie de ces pièces en particuliers sous des sollicitations de fatigue ou bien dans un milieu corrosif ainsi que de réduire la propagation des microfissures dans le matériau.

Il existe différents moyens pour appliquer ces contraintes résiduelles de compression dans un matériau comme le traitement par voie thermique, thermochimique et mécanique. De nos jours, les techniques les plus répandues dans l'industrie sont le galetage et le grenailage sous plusieurs variantes comme le grenailage conventionnel ou ultrasonore et le sablage ou microbillage [1]-[2]. Ces procédés bien connus et maîtrisés ont néanmoins l'inconvénient d'avoir une profondeur de traitement faible de l'ordre du millimètre au maximum [3] **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ainsi que de polluer le milieu avec des impuretés dans le cas du grenailage par exemple.

Récemment, de nouveaux procédés de mise en compression ont fait leur apparition comme le choc laser, la cavitation par jet d'eau et une nouvelle technique basée sur l'utilisation d'impulsions électromagnétiques que nous allons détailler dans cette publication. Ces technologies émergentes sont intéressantes sur plusieurs aspects notamment sur le fait que ces techniques sont non-polluantes pour le milieu et qu'il est possible de traiter les matériaux sur quelques millimètres. Dans le cas de la mise en compression de surfaces par impulsions électromagnétiques, les champs électromagnétiques sont utilisés pour générer des courants de Foucault dans la pièce qui vont engendrer des déformations plastiques dans le matériau via les forces de Laplace. Si les impulsions électromagnétiques sont suffisamment puissantes et rapides, des déformations plastiques apparaîtront dans le matériau qui donneront des contraintes résiduelles. Compte tenu des études préliminaires déjà réalisées, il est possible d'atteindre des profondeurs de traitement pouvant aller au-delà d'une dizaine de millimètres [4]. Un autre point intéressant est la possibilité de contrôler la profondeur de traitement et le niveau de contraintes en fonction de la fréquence et de l'énergie de l'impulsion électromagnétique.

Pour générer des impulsions électromagnétiques adaptées pour appliquer des contraintes résiduelles dans un matériau, un générateur d'impulsions de courant ainsi qu'un inducteur spécifique ont été conçus et réalisés [5]. L'objectif de ce premier dispositif est de démontrer la faisabilité de cette technologie. Pour ce faire, plusieurs tests préliminaires ont été réalisés à l'aide de ce dispositif. Les matériaux sélectionnés ont été choisis pour leur limite élastique relativement faible ce qui permet de ne pas utiliser le dispositif à plein potentiel lors des premiers essais.

2. CONCEPTION DU GENERATEUR D'IMPULSION ELECTROMAGNETIQUE

2.1. Caractéristique du dispositif

Ce dispositif est prévu pour être un démonstrateur d'application de contraintes résiduelles de compression. Comme nous avons prévu à moyen et long terme de travailler

avec une large gamme de matériaux, les paramètres électriques du générateur d'impulsions doivent pouvoir être modifiés facilement. Les caractéristiques nominales du prototype sont définies dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Caractéristiques principales du générateur d'impulsion électromagnétique.

Champs magnétique maximum.	10 à 20 T
Courant crête	50 à 100 kA
Pseudo-fréquence	27kHz Nominal
Inductance charge	250 nH Maximum.
Durée de vie	>1000 impulsions

2.2. Schéma électrique

Pour réaliser le générateur d'impulsion, un montage RLC a été choisi dont le schéma électrique est présent dans la fig. 1 [6]-[7]. Une alimentation haute tension est utilisée pour charger un banc de condensateurs composé de plusieurs condensateurs. Ces condensateurs haute tension au polypropylène métallisé sont montés en parallèle. Ce banc est capable de stocker suffisamment d'énergie pour induire des contraintes de compression dans les matériaux tests. De plus, chaque condensateur est amovible ce qui permet d'ajuster légèrement l'impédance globale du système et donc la fréquence. L'interrupteur principale, SW1, est un éclateur commandé qui permet l'amorçage de la décharge du système à une tension précise et donc à un certain niveau d'énergie.

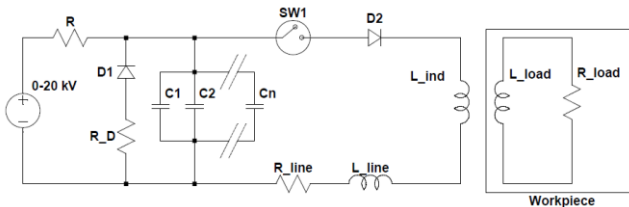


Fig. 1. Schéma électrique du générateur d'impulsion basé sur un banc de condensateur haute tension, avec un interrupteur SW1 (éclateur). Les éléments parasites (R_{line} et L_{line}) et la charge (R_{ind} et L_{ind}) sont indiqués.

Précédemment, il a été précisé que l'impulsion électromagnétique doit être suffisamment rapide et intense pour obtenir des contraintes résiduelles. Comme le courant dans un circuit RLC classique évolue de façon pseudo-sinusoidale compte tenu de l'impédance du montage, seul le premier demi-sinus est suffisamment énergétique pour induire des contraintes résiduelles. Par conséquent, pour limiter l'échauffement de l'inducteur et la sollicitation inutile des condensateurs un système de blocage du courant (via la diode D2) et de décharge automatique (via l'ensemble D1 - R_D) a été ajouté dans le montage.

2.3. Dimensionnement de l'inducteur

Pour cette nouvelle application, un inducteur a dû être spécifiquement élaboré pour répondre aux besoins de la mise en compression de surface. Un modèle numérique axisymétrique 2D du procédé a été développé lors d'une étude préliminaire sous le logiciel Sysweld. Avec ce modèle numérique, il a été possible de visualiser le niveau de contraintes résiduelles en fonction des paramètres géométriques de l'inducteur ainsi que du courant était injecté.

Basé sur ce modèle, l'inducteur utilisé est en forme de spirale et est composé de trois spires. Le rayon intérieur et la section des spires ont été optimisés pour obtenir des contraintes résiduelles. En considérant cette géométrie et des formules analytiques [8], l'inductance de cette configuration est de 220 nH. Ce résultat a été validé par simulation par éléments finis en utilisant le module Q3D d'ANSYS. L'inducteur est constitué d'un alliage de cuivre Cu-ETP avec une faible résistivité ($1.724 \times 10^{-8} \Omega/m$).

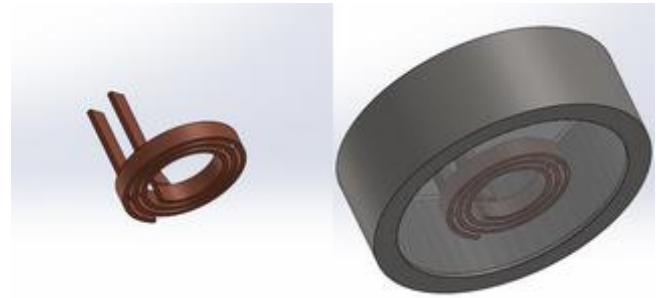


Fig. 2. Conception de l'inducteur : à gauche l'inducteur en forme de spirale en Cu-ETP et à droite le même inducteur dans son étui protecteur en fibre de verre avec son blindage en acier inox.

Pour garantir une bonne isolation électrique ainsi qu'un bon maintien mécanique de l'inducteur, un étui protecteur en matériaux isolants avec de la résine époxy a été utilisé pour contenir l'inducteur [9]-[10]. En effet, à chaque décharge des condensateurs, l'inducteur subit des efforts électromagnétiques et thermiques importantes qui obligent l'utilisation d'un support de maintien.



Fig. 3. Inducteur avec les profils inférieurs et supérieurs de l'isolation en fibre de verre.

Lors des essais, l'inducteur est supposé être placé à proximité des éprouvettes. Le profil inférieur de l'isolant a été usiné de telle sorte à garantir une distance constante à chaque essai.

2.4. Prototype du générateur d'impulsion électromagnétique

Le dispositif de mise en compression par impulsion électromagnétique est présenté dans la figure ci-dessous. Pour les essais qui ont été réalisés, le banc de condensateur a été complètement peuplé pour disposer de la capacité maximale. Un ensemble de bus barres assurent la connexion électrique entre tous les éléments du dispositif. Comme précisé ci-avant, une alimentation Spellman haute tension est utilisée pour charger les condensateurs. Afin de mesurer le courant dans l'inducteur, qui est proportionnel au champ généré, un capteur de Rogowski Powertek CWT1500B est utilisé et une sonde haute tension Northstar PVM-1 permet de visualiser la tension

des condensateurs. Ces données sont ensuite enregistrées via un oscilloscope Keysight DSOX3054T. L'acquisition est directement synchronisée au dispositif de déclenchement de l'éclateur.

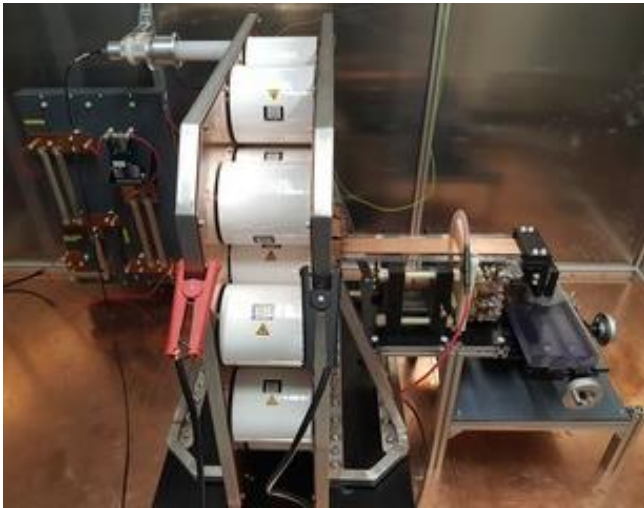


Fig. 4. Prototype du générateur d'impulsion électromagnétique avec le banc de condensateurs, l'éclateur et l'inducteur. Une table XY est utilisée pour déplacer l'échantillon sous l'inducteur.

Dans ce dispositif, les éprouvettes sont placés sous l'inducteur sur une table XY. Ceci permet un placement précis des éprouvettes sous l'inducteur notamment pour s'assurer d'un écart constant entre deux tirs, lors du traitement d'une surface étendue. Pour les essais préliminaires, un tir unique a été effectué sur différents matériaux.

Pour garantir la sécurité des personnes et des équipements alentour par rapport aux perturbations électromagnétiques, le prototype est placé dans une cage de Faraday. Un autre aspect de cette enceinte de protection est de prévenir tout risque mécanique lié à un défaut de l'inducteur ou de l'échantillon soumis à des contraintes importantes.

3. OUTILS DE CARACTERISATION

3.1. Stéréo-corrélation d'images

L'application de contraintes résiduelles de compression est liée à une déformation plastique locale du matériau pour des traitements mécaniques. Pour une pièce avec un niveau de contraintes résiduelles suffisant, l'accommodation des contraintes dans le matériau induit une déflexion macroscopique [3].

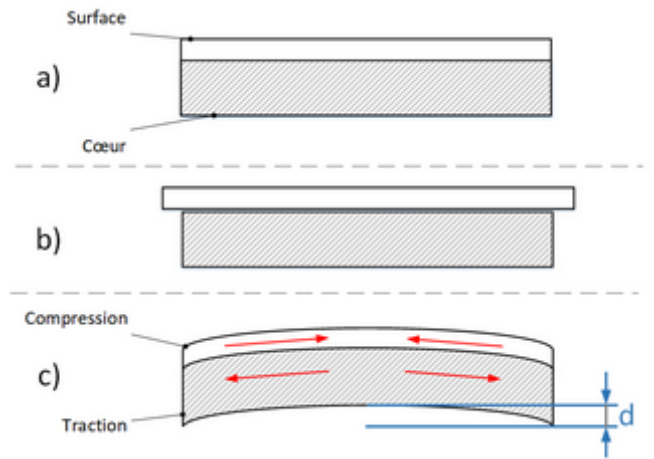


Fig. 5. Schéma de principe de mise en compression d'une éprouvette mince [3].

Les contraintes résiduelles sont majoritairement localisées dans une couche superficielle. En conséquence, cette zone de surface subit un allongement irréversible incompatible avec le reste de la pièce qui ne se déforme pas ou selon une loi de déformation différente. Cette hétérogénéité de champs de déformation provoque une déflexion positive de la pièce. Ce comportement est caractéristique de la présence de contrainte résiduelle dans le matériau.

Cette propriété peut nous permettre de confirmer la présence de contraintes résiduelles.

Cependant cette déformation reste relativement faible et difficilement à identifier à l'œil nu. Pour obtenir le profil complet de l'éprouvette avant et après traitement avec une bonne précision, un dispositif de stéréo-corrélation d'images a été employé. En effet, il est possible d'obtenir un niveau de précision de l'ordre du micromètre en utilisant cette solution [11].

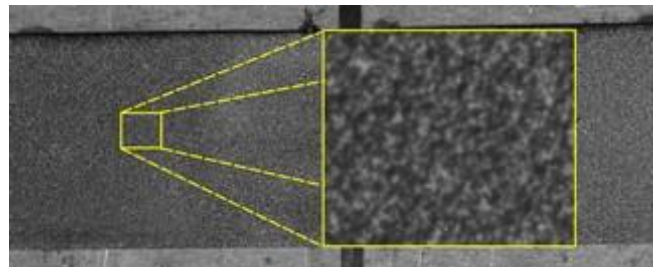


Fig. 6. Exemple d'une éprouvette mouchetée

Cette technique permet d'obtenir le profil tridimensionnel d'une éprouvette avec un moucheté en faisant une comparaison de deux clichés sous différents angles. Sur la fig. 6, il est possible de voir une éprouvette vue par une des deux caméras du système présent sur la fig. 7.



Fig. 7. Dispositif de stéréo-ocorrélation d'image.

3.2. Dispositif de mesure magnétique

Un des aspects explorés dans les tests réalisés est la corrélation entre les contraintes dans les matériaux ferromagnétiques et l'évolution des paramètres magnétiques. La perméabilité magnétique maximale et le champ coercitif sont très sensibles aux variations de microstructures en particuliers pour les matériaux ayant une perméabilité très grande comme le mumetal. En conséquence, lors de l'application de contraintes résiduelles dans une pièce, il est attendu que sa microstructure soit affectée sur les premiers millimètres de profondeurs. Il en est donc de même pour les paramètres magnétiques précédemment évoqués. Afin de quantifier les variations de ces grandeurs, l'induction magnétique locale B dans le matériau et le champ de surface H ont été observés lorsque l'éprouvette est correctement excitée.

Pour la mesure de l'induction locale B , la technique de mesure par pointes a été employée étant donné que c'est la mesure non-destructive disponible. Le principe de cette mesure est décrit dans la fig. 7. Un aspect intéressant de cette mesure est qu'elle ne change pas l'état mécanique de la pièce [12]-[13].

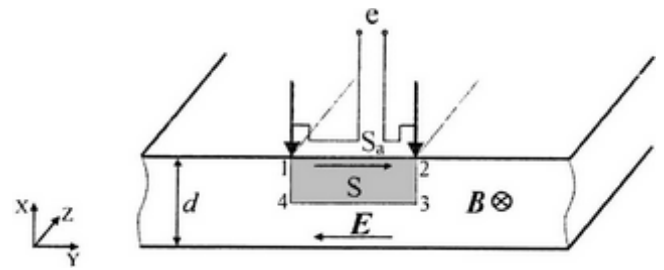


Fig. 8. Principe de la mesure par points pour la mesure du champ B . les deux points sont séparés d'une distance L .

Ce capteur permet de faire une évaluation de flux magnétique local dans le matériau en mesurant la chute de tension entre les deux pointes. Il est possible de considérer seulement la moitié de l'épaisseur du matériau si l'induction magnétique $B=B_z(x,t) \cdot l_z$ a une dépendance seulement le long de l'axe x et si les pointes sont suffisamment éloignées des bords. Dans ces conditions, la tension induite $e(t)$ est dépendante de la variation de flux dans la section $S+S_a$. Dans le cas de nos mesures, la section d'air S_a a été minimisée pour être négligée.

$$e(t) \approx \frac{1}{2} \cdot d \cdot L \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

L'équation précédente (1) permet de faire le lien entre la tension mesurée par les pointes et paramètres géométriques définis sur la fig. 7. Les tensions mesurées sont relativement faible de l'ordre de $100 \mu V$, ce qui implique l'utilisation d'un amplificateur.

La mesure du champs de surface est faite simplement en utilisant une bobine d'induction placé en surface du matériau. La tension induite dans la bobine est donné en appliquant la loi de Faraday [13].

$$V = -n \cdot \frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

Dans cette équation, n représente le nombre de spires et A la surface intérieure de la bobine.



Fig. 9. Capteurs "B-H" avec sont support. Les pointes sont faites de avec deux pointes en laiton. La bobine d'induction est placé entre les points et est constitué de 200 spires.

Les deux capteurs ont été intégrés à un support fabriqué grâce une imprimante 3D comme il est possible de le voir sur la fig. 9. Les pointes sont espacées de 1 mm pour permettre de placer la bobine d'induction entre. La carte d'acquisition du système permet de faire une calibration des capteurs avant chaque mesure, ce qui implique que les paramètres des pointes et de la bobine n'ont pas besoin d'être connus par la carte. Via une excitation magnétique de la pièce à mesurer, il est possible

de faire une mesure locale de $B(t)$ et $H(t)$ en parallèle. Ainsi, il est possible de tracer les cycles hystérésis et de récupérer les informations sur la perméabilité et le champ coercitif.

4. RESULTATS PRELIMINAIRES

Pour ne pas utiliser le dispositif à pleine charge dès les premiers essais, il a été convenu de faire des tests sous charges réduites. Afin d'appliquer des contraintes résiduelles de compression avec une puissance réduite, les matériaux qui ont été sélectionnés disposent d'une limite élastique faible. Les deux matériaux sont : l'aluminium AA6061 T0 et le mumétal qui disposent d'une limite élastique respectivement de 55 Pa et 160 MPa.

4.1. Essai de fonctionnement du générateur

Ces premiers essais de fonctionnement ont été réalisés avec des éprouvettes d'aluminium AA6061 T0 de 2 mm d'épaisseur au niveau de l'inducteur. Elles ont été placées de façon à ce que le tir soit fait sur le côté des éprouvettes. Ainsi la visualisation de la déflexion sera plus simple.

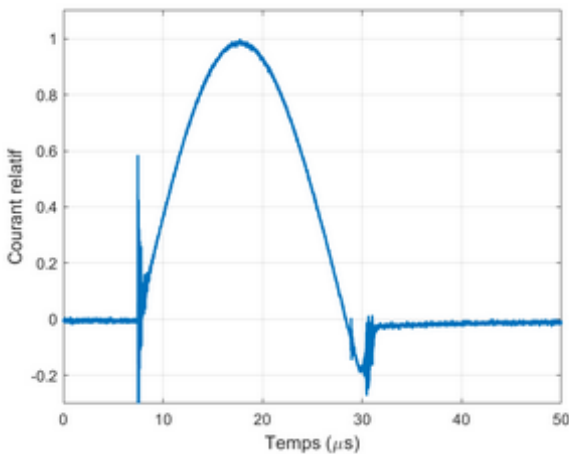


Fig. 10. Courant dans l'inducteur lors d'un essai sur de l'AA6061 T0 mesuré à l'aide d'une sonde de Rogowski. Les condensateurs ont été chargé de sorte à obtenir un courant de 50kA.

La figure ci-dessus illustre le courant typique lors d'une décharge. Seul le premier demi-sinus apporte suffisamment d'énergie pour permettre une déformation plastique dans le matériau et donc des contraintes résiduelles. Le courant mesuré sur la fig. 10 correspond bien à ce qui était simulé.

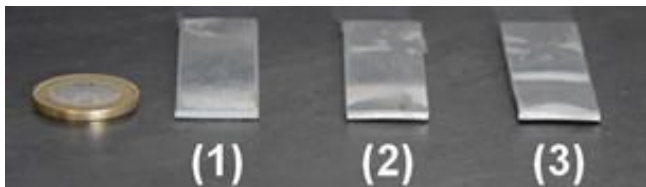


Fig. 11. Eprouvettes en AA6061 T0 avant et après traitement. L'éprouvette (1) est non-traitée tandis que les éprouvettes (2) et (3) ont été traitées avec des décharges de 50 kA et 90 kA.

Plusieurs essais ont été conduits sur des éprouvettes d'aluminium pour deux niveaux de charge des condensateurs et donc pour différents courants. La fig. 11 illustre deux éprouvettes ayant subi un seul tir pour des niveaux de courant de 50 kA et de 90 kA. Une déflexion positive peut ainsi être

observée au niveau de la zone d'impact ce qui est caractéristique de la mise en compression. Un essai avec un courant plus important va engendrer un niveau de déformation plastique supérieur. La déflexion observée est liée au niveau de cette déformation plastique. L'éprouvette qui a été traitée à 90 kA présente une déflexion plus importante que celle traitée à 50 kA.

4.2. Mesures du profil de déformation sur le mumétal

Plusieurs tests ont été ensuite réalisés sur les éprouvettes de mumétal faisant 1 mm d'épaisseur. Cependant comme la limite élastique du mumétal est supérieure à celle de l'aluminium AA6061 T0, seuls des essais à 100 kA ont été réalisés afin d'induire des efforts suffisamment importants dans la matière tout en conservant un niveau de charge des condensateurs relativement faible. Cependant la déflexion attendue est plus faible de celles observées lors des essais précédents. Pour remédier à cela, une mesure du profil de l'échantillon a été réalisée par stéréo-corrélation d'images.

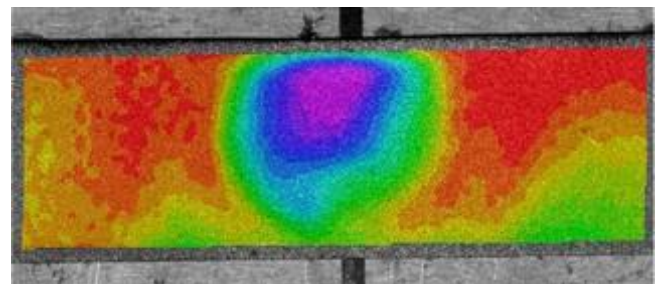


Fig. 12. Topographie d'une éprouvette de mumétal traitée avec une décharge de 100 kA réalisée avec une stéréo-corrélation d'images. La zone en couleurs froides représente la déflexion positive.

Lors des essais précédents, les tirs ont été réalisés sur le côté des éprouvettes. Etant donné qu'une mesure de stéréo-corrélation d'images sera faite avant et après traitement, les essais ont été réalisés au centre des éprouvettes. La fig. 12 présente un résultat de corrélation d'images d'une éprouvette de mumétal ayant été traitée avec un tir unique à 100 kA. Il est ainsi possible de visualiser la déflexion positive liée à la présence de contraintes résiduelles dans le matériau.

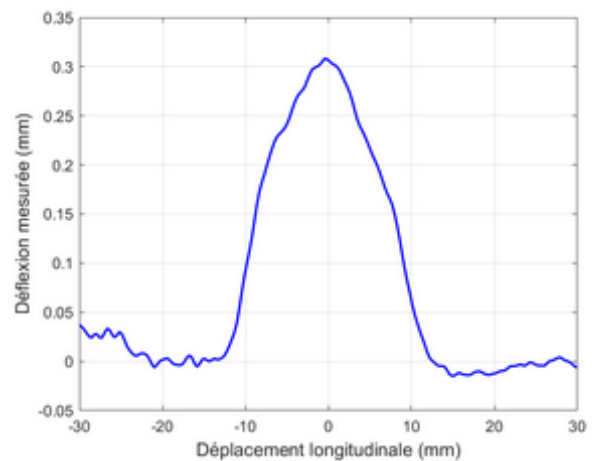


Fig. 13. Résultats issus de la stéréo-corrélation d'images le long de la ligne de référence.

Basé sur une ligne de référence suivant l'axe longitudinal (axe x) de l'éprouvette et passant au centre, le profil de formation selon l'axe z a pu être extrait et comparé au profil original de l'éprouvette. Ainsi les résultats présents sur la fig. 13 mettent en évidence la présence d'une déflexion positive d'environ 0,3 mm au niveau de la zone où se situait l'inducteur lors du tir. Au vu de ce profil, il est possible de conclure que l'impulsion électromagnétique a permis la formation de contraintes résiduelles dans le matériau.

4.3. Mesures du champ coercitif et de la perméabilité pour les éprouvettes de mumétal

Les propriétés magnétiques d'un matériau ferromagnétique sont fortement dépendantes de l'état de sa microstructure et des contraintes internes introduites. Comme des contraintes résiduelles ont été introduites, comme le montre la fig. 14.

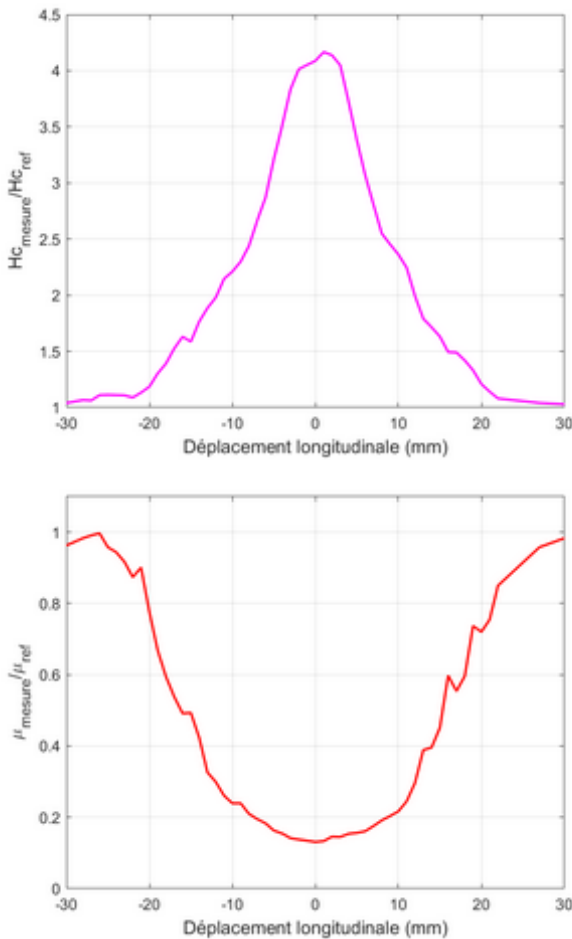


Fig. 14. Evolution du champ coercitif relatif (en violet) et de la perméabilité maximale relative (en rouge) le long de la ligne de référence. L'origine de l'axe longitudinale correspond au centre de l'inducteur.

Cette mesure est réalisée à l'aide du capteur précédemment présent dans la partie 3.2 et grâce à une excitation magnétique adéquate. A partir du cycle hystérésis globale à saturation, il a été possible d'extraire les valeurs du champ coercitif et de la perméabilité maximale.

Comme il est possible de le voir, le champ coercitif et de la perméabilité maximale, fig. 14 et fig. 15, sont fortement modifiés par l'application de contraintes résiduelles de compression par impulsion électromagnétique. L'introduction de contraintes dans le matériau augmente le nombre de dislocations et peut-être affecte la taille des grains du matériau. Il a été montré dans la littérature que les propriétés magnétiques tels que le champ coercitif et la perméabilité maximale sont sensibles aux variations de ces paramètres [14].

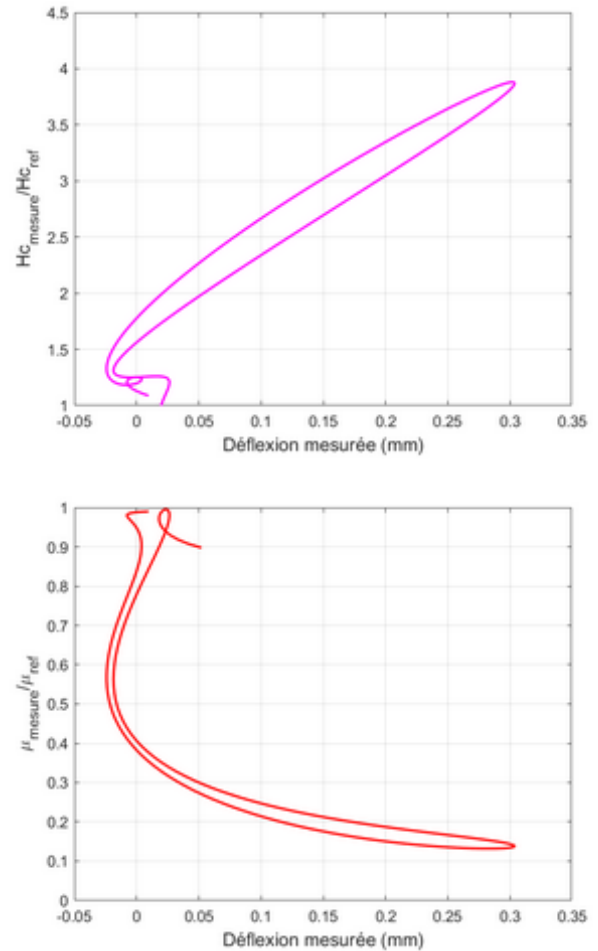


Fig. 15. : Evolution du champ coercitif relatif (en violet) et de la perméabilité maximale relative (en rouge) en fonction de la déformation mesurée par stéréo-corrélation d'images.

La zone où les paramètres magnétiques sont modifiés semble plus étendue que la zone où la déformation macroscopique est observée. En effet, la zone de déformation macroscopique est liée à une quantité suffisante de contraintes dans le matériau. Cependant, il est possible que des contraintes résiduelles soient présentes dans la zone en dehors de la déformation mais soient insuffisantes pour induire une déformation mesurable. Toutefois ces contraintes peuvent avoir un effet suffisant pour induire des variations sur les propriétés magnétiques du matériau. Des mesures et simulations complémentaires doivent être réalisées.

5. CONCLUSION

Le prototype qui a été développé est fonctionnel et permet de générer des impulsions de courant nécessaires pour produire des champs électromagnétiques suffisants pour introduire des contraintes résiduelles de compressions dans des matériaux. Les résultats ont démontré que l'application de contraintes de compression a un impact sur ses propriétés magnétiques. En continuant la caractérisation de l'évolution de ces paramètres, il sera peut-être possible d'évaluer le niveau de contraintes résiduelles dans le matériau.

6. REMERCIEMENT

Ce projet est financé par l'Institut Carnot Ingénierie@Lyon (Projet « ElectroMagnetic Peening »).

7. REFERENCES

- [1] Chaise T., Nélias D. "Contact pressure and residual strain in 3D elastoTplastic rolling contact for a circular or elliptical point contact." *Journal of Tribology* 133, 2011, pp 041402T1T9.
- [2] Chaise T., Nélias D., Sadeghi F. "On the effect of isotropic hardening on the coefficient of restitution for single or repeated impacts using a semi analytical method." *Tribology Transactions* 54, 2011, pp 714T722.
- [3] Barralis Jean ,Castex Louis and Maeder Gérard. "Precontraintes et traitements superficiels". *Techniques de l'ingénieur Traitements thermiques superficiels et thermochimiques*, 1999.
- [4] Emmanuel Sonde, Thibaut Chaise, Daniel Nelias, Vincent Robin. Numerical simulation of electromagnetic surface treatment
- [5] Lehr, Jane, and Pralhad Ron. *Foundations of Pulsed Power Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [6] Werner Hartmann, Michael Rumheld. "Design of a High Current Pulse Generator for Magnetofforming," 310–13. *IEEE*, 2004.
- [7] Nashilevskiy, A. V., G. G. Kanaev, V. I. Krauz, V.V. Myalton, G. E. Remnev, and V. P. Vinogradov. "High-Current Pulse Generator for Plasma Focus," 923–26. *IEEE*, 2011.
- [8] E. B Rosa, F.W. Grover. Inductance Calculations. *Scientific Papers of the Bureau of Standards no 169 (1916) 163-171*
- [9] VanBenthysen, Reid, Ethan Thibaudeau, and Brad L. Kinsey. "Effect of Specimen Planar Area on Electromagnetic Flanging." *Journal of Manufacturing Processes* 15, no. 2 (April 2013): 194–200.
- [10] Thibaudeau, Ethan, and Brad L. Kinsey. "Analytical Design and Experimental Validation of Uniform Pressure Actuator for Electromagnetic Forming and Welding." *Journal of Materials Processing Technology* 215 (January 2015): 251–63.
- [11] Stéphane Roux, Julien Réthoré, François Hild. Digital Image Correlation and Fracture: An Advanced Technique for Estimating Stress Intensity Factors of 2D and 3D Cracks. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, 2009, 42, 214004 (21pp).
- [12] De Wulf, Marc, Luc Dupré, Dimitre Makaveev, and Jan Melkebeek. "Needle-Probe Techniques for Local Magnetic Flux Measurements." *Journal of Applied Physics* 93, no. 10 (May 15, 2003): 8271–73.
- [13] S. Tumanski. *Handbook of Magnetic Measurements*. CRC, (2011) 164-186.
- [14] I. Preece, R. Thomas. *The 77 Effects of Various Stresses on Mumetal: Percent Ni-14 Percent Fe-5 Percent Cu-4 Percent Mo*. *IEEE Transactions on Magnetics (Vol: 7, Issue: 3, September 1971): 554-557*.