



HAL
open science

On magnetic pulse welding machines: deformation measurements and defect detection

Issyan Tekaya, Robert Bouzerar, Valéry Bourny, Clément Rabette, Matthieu Morel,
Olivier Durand-Drouhin

► To cite this version:

Issyan Tekaya, Robert Bouzerar, Valéry Bourny, Clément Rabette, Matthieu Morel, et al.. On magnetic pulse welding machines: deformation measurements and defect detection. CFM 2017 - 23ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2017, Lille, France. <hal-03465442>

HAL Id: hal-03465442

<https://hal.science/hal-03465442v1>

Submitted on 3 Dec 2021

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.



HAL Authorization

Mesures de déformation et détection de défauts dans les machines de soudage par impulsion magnétique

I. TEKAYA^a, R. BOUZERAR^a, V. BOURNY^b, C. RABETTE^a, M. MOREL^c et O. DURAND-DROUHIN^a

a. Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Université de Picardie Jules Verne, 33 rue Saint Leu, 80039 Amiens Cedex, France

b. Laboratoire des Technologies Innovantes, Université de Picardie Jules Verne, 33 rue Saint Leu, 80039 Amiens Cedex, France

c. Plate-forme technologique Innovaltech, Lycée Condorcet, Rond-point Frédéric Joliot Curie, 02100 Saint Quentin, France

Résumé :

Ce travail a pour but de présenter des méthodes conçues pour la caractérisation des machines à impulsions magnétiques, dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement mais également d'identifier leurs défauts, qui peuvent être nuisibles à la qualité des pièces à souder, et la mesure des déformations mécaniques en utilisant des techniques électriques pendant le processus de soudage. Trois parties distinctes sont présentées ici. Les deux premières concernent la spectroscopie d'impédance : en premier lieu, cette technique est mise à profit pour effectuer une caractérisation électrodynamique complète de telles machines. Dans un deuxième temps, nous proposons un cadre théorique sous-jacent à une technique innovante qui pourrait s'avérer très utile pour la mesure in situ des déformations mécaniques des pièces durant leur soudure. Dernièrement, un outil de diagnostic numérique est exposé, permettant la détection et l'identification des défauts de ces machines. Cet outil est basé sur l'analyse spectrale et temps-fréquence.

Abstract :

This work aims to present methods designed both to characterize magnetic pulse machines in order to better understand their functioning but also identify their defects, which could prove detrimental to the quality of the welded pieces, and to measure mechanical deformations using electrical techniques during the welding process. Three distinct parts are presented here. The first two parts deal with the use of impedance spectroscopy: firstly, this technique is used to carry out a complete electrodynamic characterization of such machines. Secondly, we introduce the theoretical background behind a novel technique which could be useful in measuring the mechanical deformations of the pieces during a weld. Lastly, a numerical diagnosis tool that proves interesting for the detection and identification of defects of these machines, is exposed. This tool is based on spectral and time-frequency analysis.

Mots clefs : impulsion magnétique, spectroscopie d'impédance, temps, fréquence, mesure de déformations, défauts

1 Introduction

Le soudage par impulsion magnétique est un procédé propre, efficace et très rapide qui permet la soudure de métaux différents et donc avec des points de fusion distincts, sans avoir besoin d'ajouter de la matière supplémentaire, contrairement aux méthodes traditionnelles de soudage à chaud (basées sur la fusion) [1, 2]. Le principe physique sous-jacent est simple, mais la structure de telles machines est d'une grande complexité.

Dans le cas de pièces cylindriques et concentriques à souder, la soudure est effectuée par accélération brutale de la pièce extérieure sur la pièce intérieure, à des vitesses de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde. Ce choc permet à la fois un nettoyage des impuretés se trouvant en surface des pièces, mais également un réarrangement moléculaire de sorte à obtenir un assemblage métallique pur. De ce fait, on appelle ce type de procédé une fusion « à froid » par opposition aux méthodes habituelles.

Cette accélération a lieu durant un temps très court, de l'ordre de 60-100 μ s. Celle-ci est le résultat de l'application durant ladite impulsion d'un champ magnétique de très haute densité, générant ainsi des courants induits dans la pièce extérieure et créant à leur tour des forces de Laplace radiales causant l'implosion de cette pièce sur la pièce intérieure et leur soudure. L'impulsion magnétique provient de la circulation d'un courant de forte intensité dans une bobine massive, de plusieurs centaines de kA jusque 1-2 MA pour les systèmes les plus puissants. C'est un générateur haute tension qui charge une banque de condensateurs répartis en parallèle, chaque étage composant la banque étant doté d'un interrupteur haute puissance (typiquement des éclateurs ou des thyratrons), lesquels se déchargent dans la bobine de mise en forme. Une vue schématique de la machine est présentée sur la figure 1 ci-après.

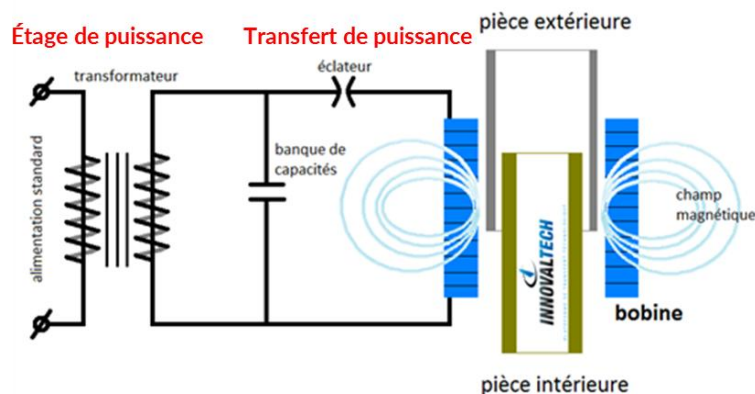


FIG. 1 – Représentation schématique d'une machine à impulsions magnétiques. Dans cette configuration, la machine est en mode « soudage » de pièces cylindriques.

Ces machines peuvent présenter des défauts de natures différentes, engendrant ainsi des effets variés. Dans cet article, nous nous intéresserons tout d'abord à l'étude électrodynamique réalisée expérimentalement dans le but de caractériser ces machines. Effectivement et comme nous allons le montrer, ces machines se comportent de façon simplifiée comme un circuit RLC dont les paramètres le définissant de façon effective peuvent être déduits par une analyse des signaux mesurés au sein de ces machines. Par la suite, nous montrerons comment l'application du formalisme lagrangien, couplé à des mesures par impédancemétrie, peut permettre de déterminer le déplacement mécanique des pièces durant un soudage. Ceci est intéressant puisque cette technique constituerait une alternative économique aux techniques existantes (de nature optique), complexes de mise en œuvre et

onéreuses. Enfin nous verrons comment les méthodes existantes de traitement du signal et d'analyse temps-fréquence permettent de détecter des défauts de ce type de machines, dans le but de pouvoir proposer des solutions d'optimisation.

2 Caractérisation électrodynamique

2.1 Analogie RLC

Toutes nos campagnes expérimentales ont été menées sur deux machines à impulsions magnétiques mises à disposition à la plate-forme technologique Innovaltech de Saint-Quentin (02). L'une d'elle est un modèle MP 25 9 de *Pulsar Ltd.*, délivrant une énergie maximale de 25 kJ et dont les courants peuvent atteindre 600 kA. L'autre machine a été conçue par l'entreprise *Hazemeyer* et délivre au maximum 112 kJ pour des courants pouvant avoisiner 1 MA selon le type de bobine utilisée.

Des mesures de l'intensité du courant circulant dans la bobine de mise en forme du champ magnétique ont été réalisées, à l'aide d'une sonde de Rogowski. Ceci permet d'avoir la courbe de décharge du courant durant une impulsion, en fonction du temps. Un exemple typique de ces courbes est présenté sur la figure 2.

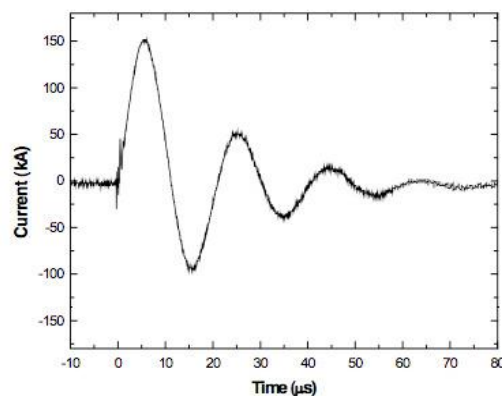


FIG. 2 – Courbe de décharge du courant circulant dans la bobine de formage en fonction du temps, durant une impulsion.

Cette courbe est réminiscente de celles obtenues pour des circuits RLC en régime pseudo-périodique, qui sont des sinusoides exponentiellement amorties. La validité d'une hypothèse d'un comportement type-RLC a été préalablement réalisée par nombre d'auteurs [3, 4]. Ceci étant, il est ainsi possible de faire usage des techniques issues de la spectroscopie d'impédance pour obtenir les valeurs des paramètres R , L et C du circuit équivalent.

2.2 Déterminations des paramètres effectifs

En supposant que la capacité du circuit est uniquement répartie dans la banque de condensateurs, ce qui est une approximation raisonnable étant donné la petitesse des capacités mises en jeu sur la totalité du circuit, nous avons mesuré la capacité d'un condensateur isolé (de la machine *Pulsar*) par impédancemétrie (modèle *Hioki IM3570*), sur une gamme de fréquences s'étalant de 4 Hz à 5 MHz. La figure 3 présente le dispositif expérimental.



FIG. 3 – Dispositif expérimental de mesure de l'impédance d'un condensateur sur la machine *Pulsar MP 25 9*, à l'aide d'un impédancemètre.

Ces mesures donnent une capacité de 43,7 μF , soit une valeur proche de celle annoncée par le constructeur (de 46 μF) ; l'usure étant responsable de cette différence. Sur cette machine, la banque de condensateurs se décompose en cinq étages de trois condensateurs, le tout étant réparti en parallèle. Ainsi la capacité totale de la banque vaut $C = 3 \times 5 \times 43,7 = 655,5 \text{ } \mu\text{F}$.

En présumant de la même façon que la bobine de tir comporte l'unique composante inductive du système (ce qui est discutable car les fils de transmission du courant en comportent également une, toutefois très probablement bien plus faible), une mesure similaire de l'impédance de cette bobine a été réalisée, dans le but d'évaluer son inductance. On trouve ainsi une inductance pour une bobine en cuivre monotour $L_{Cu} \approx 0,235 \text{ } \mu\text{H}$. Des mesures similaires sur de l'acier ont donné une inductance $L_{St} \approx 0,269 \text{ } \mu\text{H}$.

L'estimation de la résistance effective de la machine au complet se veut une tâche plus ardue. Effectivement, il est impossible de la mesurer directement au vu des courants et tensions mis en jeu mais également du fait de la structure complexe du dispositif. Ecrivons tout d'abord l'expression de la pseudo-fréquence des courants circulant dans un circuit RLC,

$$2\pi f = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$$

Avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\lambda = \frac{R}{2L}$ et R représentant la résistance effective du système. Cette dernière est la somme des résistances de tous les étages de puissance, comprenant ainsi la résistance électrique provenant des interrupteurs mais également des lignes d'amenée du courant. Sachant que le nombre d'étages connectés N influencera la valeur de la fréquence du courant, nous avons procédé à une mesure du courant en faisant varier ce nombre d'étages N dans le but d'en déduire à chaque fois la pseudo-fréquence correspondante en fonction de N . Cette grandeur prend ainsi la forme suivante,

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L * 3NC} - \left(\frac{R}{N}\right)^2 \frac{1}{4L^2}}$$

Ou encore,

$$f^2 N^2 = \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{N}{3CL} - \frac{R^2}{4L^2} \right)$$

Cette réécriture permet de représenter $f^2 N^2$ comme une fonction linéaire de N (figure 4) et ainsi d'obtenir la valeur de R par régression linéaire.

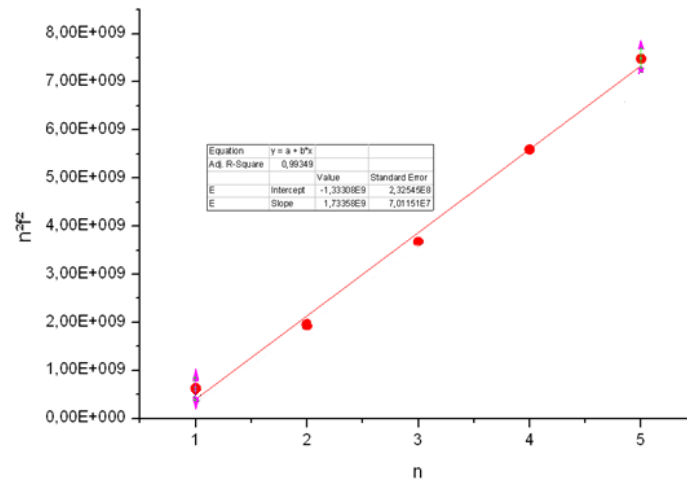


FIG. 4 – Représentation de $f^2 N^2$ en fonction du nombre d'étages connectés et son ajustement linéaire.

La valeur de l'ordonnée à l'origine donne une estimation de la résistance, telle que $R \approx 51,1 \text{ m}\Omega$. Cette étude est d'importance car elle permet de mieux déceler le fonctionnement de la machine. Effectivement, les pertes énergétiques se séparent en deux catégories : une partie de l'énergie est dissipée par effet Joule du fait de la résistance du système (estimée précédemment) et une autre partie de ces pertes provient de l'énergie rayonnée à grande distance. Dans le but d'optimiser énergétiquement ces machines, il est nécessaire de connaître ces pertes et c'est dans ce cadre que notre étude a été menée.

3 Mesures des déformations par spectroscopie d'impédance

Dans cette partie, nous nous intéressons à une application de la spectroscopie d'impédance qui, comme nous allons le montrer, pourrait constituer la base d'une technique visant à déterminer la déformation de tubes cylindriques en cours de soudure. Des techniques existantes, pour la plupart de nature optique, permettent d'obtenir les vitesses d'implosion de tels tubes en temps réel, pendant le procédé : on peut notamment citer la vélocimétrie photonique par effet Doppler (en Anglais *PDV* pour *Photonic Doppler Velocimetry*), qui est très performante et permet d'obtenir des résolutions temporelles élevées. Ces techniques ont néanmoins pour défaut d'être très onéreuses.

Une alternative aux méthodes optiques repose sur les mesures électriques. En effet, comme nous allons le voir, la mesure de l'impédance du système physique formé par les deux tubes durant l'effondrement du tube extérieur, peut permettre d'obtenir l'évolution de sa déformation au cours du temps.

Lors de l'insertion de tubes métalliques pour leur soudure, l'analogie électrique global du système est modifié : ce sous-système joue le rôle de récepteur de l'énergie magnétique générée par la bobine. Une approche simplifiée du problème, de nature très complexe, permet d'apparenter la configuration cylindrique des tubes concentriques à un condensateur cylindrique dont les armatures ne seraient autres que ces tubes. Ainsi, il est possible de construire un analogue électro-mécanique permettant le couplage des degrés de liberté électrique (charge $Q(t)$ du condensateur) aux degrés de liberté mécanique (déformation $x(t)$ du tube extérieur). Ce modèle est présenté sur la figure 5 suivante, où le ressort modélise les propriétés élastiques des tubes et $e(t)$ représente la tension électrique existant entre les tubes.

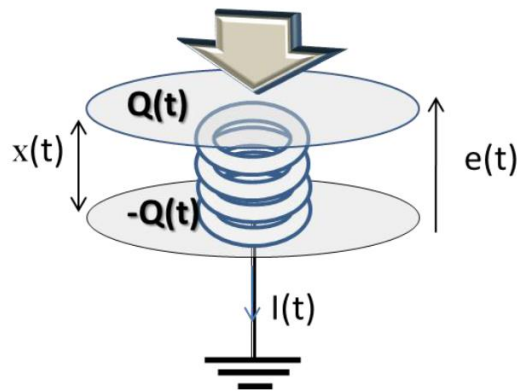


FIG. 5 – Représentation schématique des deux tubes élastiques coaxiaux sous la forme d'un condensateur cylindrique et mise en évidence du couplage entre les degrés de liberté électrique et mécanique

Sans prendre en compte la dissipation du système, le Lagrangien décrivant la dynamique de ce système prend la forme suivante,

$$L(x, \dot{x}) = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 - \frac{1}{2} k (x(t) - \bar{x})^2 + F_m(t) x(t) - \frac{1}{2} C(x(t)) e^2(t)$$

Le premier terme apporte la contribution mécanique incluant la force magnétique F_m , et le dernier, donnant l'énergie électrique emmagasinée dans les pièces déformables, génère le couplage entre les degrés de liberté électrique et mécanique. L'équation dynamique donnant l'évolution de la déformation $u = x(t) - \bar{x}$ avec ajout d'une force dissipative s'écrit,

$$\begin{cases} \ddot{u} + \eta \dot{u} + \omega_0^2(t) u = F_m(t) - \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x}(\bar{x}) e^2(t) \\ \omega_0^2(t) = \frac{k}{M} + \frac{1}{M} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}(\bar{x}) e^2(t) \end{cases}$$

La seconde équation, non écrite ici, concerne l'évolution de la tension entre les armatures au cours de la déformation, l'amortissement étant assuré par la résistance électrique des tubes. Un terme d'inertie lié à l'énergie des courants induits dans les tubes (terme inductif) a été omis dans cette version simplifiée du problème. L'étude de la variation de cette inductance avec la déformation mécanique des tubes est actuellement en cours mais son omission, en première approximation, ne modifie en rien le contenu du procédé spectroscopique visé. Il en résulte ainsi un système d'équations différentielles couplées. Cependant, en mesurant la capacité durant tout le processus de soudage à l'aide d'un analyseur d'impédance, il sera possible de résoudre numériquement le système d'équations présenté ci-dessus et ainsi d'obtenir la déformation au cours du temps. Deux configurations différentes sont ainsi exploitables, l'une visant à déterminer les caractéristiques mécaniques des tubes in situ en régime élastique (par application d'un champ magnétique de faible amplitude) et l'autre a pour objectif de visualiser la cinétique de déformation des tubes en soudage, c'est-à-dire en régime plastique. Ceci permettra ainsi d'optimiser les processus de soudage et de formage puisque notre compréhension de la dynamique des déformations sera améliorée.

4 Détection et analyse des défauts

A partir des courbes de décharge du courant comme celle présentée en section 2.1, il est possible de procéder à une analyse de certains défauts de la machine. Effectivement, certaines anomalies de fonctionnement ou défauts d'optimisation peuvent se traduire par des différences de morphologies de ces courbes, de leurs spectres, ou encore de diverses transformations mathématiques associées. Dans

cette partie, nous montrons les dissimilitudes apparentes entre les deux machines à notre disposition et manifestées au travers de traitements des signaux obtenus.

4.1 Analyse spectrale

Un simple calcul de transformée de Fourier rapide d'une courbe de décharge du courant $i(t)$ dans la bobine de la machine Hazemeyer (figure 6a) donne le spectre représenté sur la figure 6b. On note la forme caractéristique de l'intensité mesurée ici, qui trahit lors de ce tir un défaut de la machine lié à une désynchronisation des étages de puissance. En effet, il arrive que, suivant le type d'interrupteur de puissance utilisé, les étages de puissance ne se déchargent pas rigoureusement au même instant et soient ainsi sensiblement déphasés. Cela a plusieurs conséquences : le pic de courant engendré (et donc le champ magnétique maximal engendré) sera plus faible que prévu, puisque la puissance de chaque étage ne s'additionnera pas correctement. Ainsi, la pression magnétique maximale générée peut être insuffisante pour produire une soudure de bonne qualité, étant donné que c'est cette valeur qui conditionne la déformation des pièces. Ce type de défaillance se traduit sur les courbes $i(t)$ par des lobes multiples apparaissant au niveau du premier pic de décharge du courant (visibles sur la figure 6a). Par ailleurs, des soudures de mauvaise qualité (comme celles présentées sur la figure 7) où le motif de vagues caractéristique est altéré peut être indirectement dû à un défaut de déclenchement (désynchronisation) des éclateurs [5]. En effet, deux paramètres sont importants pour la réalisation d'une bonne soudure : l'angle d'impact et la vitesse de collision. Cette vitesse étant diminuée dans le cas où les étages de puissance sont désynchronisés, elle devient donc insuffisante et provoque une altération de la soudure, aisément observable au microscope (figure 7).

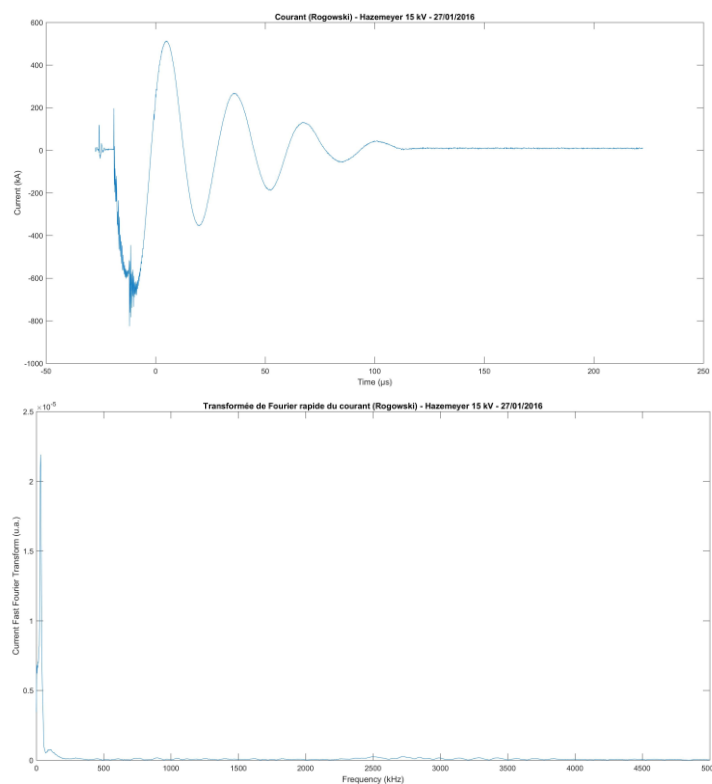


FIG. 6 –a (en haut) : courbe de décharge du courant $i(t)$ dans la bobine de tir, machine Hazemeyer (unités : μs et kA). On note le double lobe apparaissant au pic de courant maximal. b (en bas) : Transformée de Fourier rapide de $i(t)$ en fonction de la fréquence (unités : kHz et u.a.). On note qu'hormis le pic à la fréquence fondamentale (31 kHz), le spectre est relativement plat.

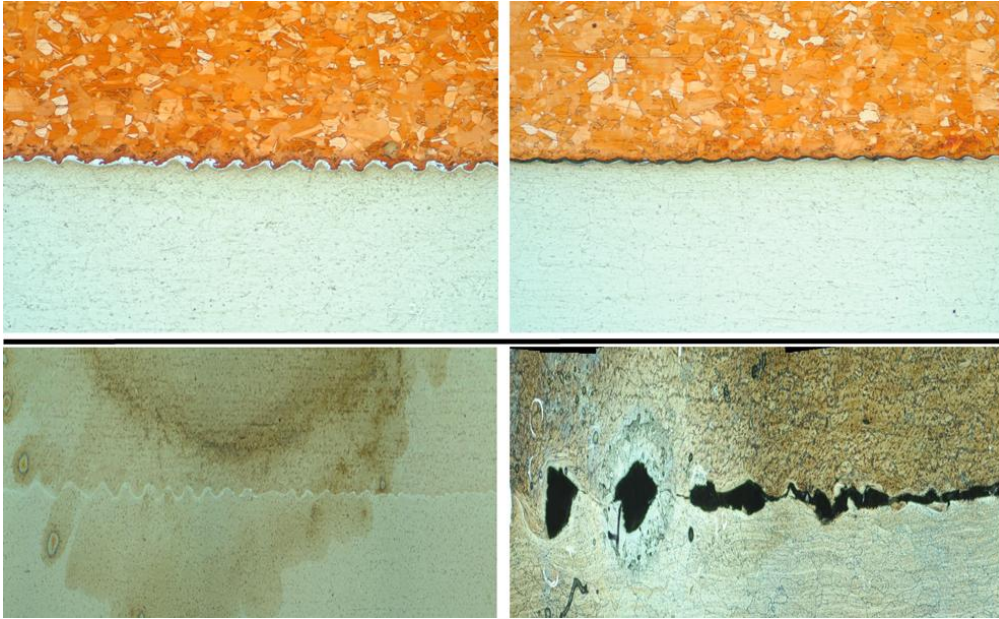


FIG. 7 –Photographies prises au microscope optique montrant les interfaces au niveau des soudures. A gauche, les soudures sont de bonne qualité et à droite le motif de vagues caractéristique apparaissant est considérablement déformé, résultant en une soudure de mauvaise facture. En haut : soudure Al 6061-T6etCu. En bas : soudure Al 6061-T6et Al 6161-T6. Une vague a typiquement ici une longueur d'onde moyenne de 80-100 μm .

On constate qu'aucun signe caractéristique ne se manifeste sur le spectre du signal, alors qu'un défaut est lui observable sur la courbe en temps. De plus, il est important de noter que les signaux que nous mesurons ne sont pas stationnaires (au sens du traitement du signal) : leurs composantes spectrales varient au cours du temps. A cet effet, il ressort que l'analyse spectrale usuelle, passant par le calcul des transformées de Fourier, n'est pas l'outil adapté à notre étude. C'est dans ce cadre que nous nous dirigeons vers des outils plus adéquats utilisés en analyse temps-fréquence, ce qui fait l'objet du sous-chapitre suivant.

4.2 Analyse temps-fréquence

Cette famille de techniques de traitement du signal permet d'analyser un signal à la fois dans le temps et dans le domaine spectral. Les représentations en découlant sont plus riches que ceux issus de l'analyse spectrale traditionnelle puisque le contenu temporel est également présent. En utilisant un code de calcul développé sous *Matlab*, nous avons pu en tirer des diagrammes regroupant toutes ces informations, appelés spectrogrammes. Ceux-ci proviennent du calcul des transformées de Fourier à court terme (encore appelées transformées de Fourier à fenêtre glissante) de l'intensité $i(t)$: on obtient une « image » où la grandeur représentée est la densité spectrale de puissance du signal en fonction de sa fréquence et de son évolution temporelle. On obtient ainsi le type de diagramme représenté figure 8.

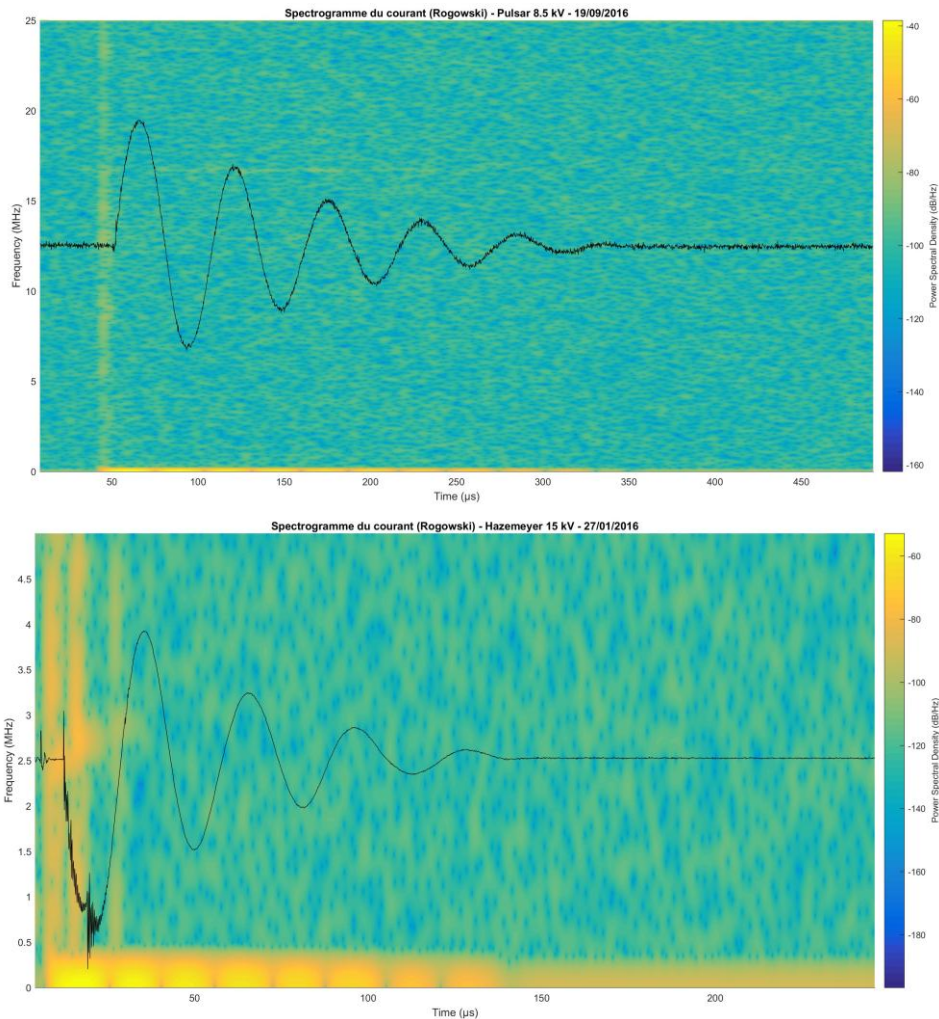


FIG. 8 –Spectrogrammes : densités spectrales de puissance de l’intensité du courant en fonction de la fréquence en ordonnées et du temps en abscisses (unités : dB/Hz, MHz et μ s). Ont été superposées à ces diagrammes les courbes de décharge du courant (unités arbitraires). a (en haut) : mesure issue de la machine *Pulsar* (de fréquence fondamentale d’environ 17 kHz). b (en bas) : mesure issue de la machine *Hazemeyer* (de fréquence fondamentale d’environ 31 kHz).

La figure 8 montre des différences flagrantes entre les deux tirs effectués sur ces machines. En effet, sur la figure 8b (machine *Hazemeyer*) on note en premier lieu et du fait d’un défaut de désynchronisation des éclateurs, des bandes verticales multiples apparaissant de façon décalée dans le temps. Celles-ci traduisent le fait que l’énergie est libérée en plusieurs fois, chaque bande verticale correspondant à un étage de puissance qui se décharge. Ceci est à contraster avec la figure 8a où l’on observe une bande verticale unique et où les étages sont ainsi bien synchronisés.

Un autre trait observable est le fait que les couleurs sont globalement plus chaudes sur la figure 8b par rapport à la figure 8a. Cela signifie que la puissance y est répartie sur une bande spectrale bien plus large qu’autour de la fréquence fondamentale (bande horizontale du bas) et qu’elle est par conséquent inutilisée.

Ces deux observations mènent à deux conclusions : d’une part le fait que l’énergie soit distribuée de manière bien plus efficace (dans une bande spectrale bien plus fine) dans une machine plutôt que dans une autre et d’autre part le fait que les déphasages de déclenchement des interrupteurs de puissance (désynchronisations des étages de puissance) conduisent à des libérations d’énergie dans une bande de fréquences colossale. On peut ainsi en déduire que l’efficacité énergétique est bien meilleure dans une

des deux machines. Par ailleurs, sur celle souffrant d'un défaut d'optimisation, les énergies déchargées ne s'additionnant pas correctement, l'énergie totale est inférieure à celle nécessaire à une soudure de bonne qualité (figure 7).

4.3 Analyse par ondelettes

L'analyse par ondelettes est un outil de plus en plus répandu pour la détection des défauts [6]. En transformant un signal en une somme d'ondelettes (transformation discrète) à différentes échelles, on peut mettre en avant certaines caractéristiques de ce signal comme des défauts ou des discontinuités de faible amplitude qu'il présenterait. Un exemple de décompositions en ondelettes est ainsi présenté sur la figure 9 suivante. C'est la courbe de la figure 6a (courbe $i(t)$ de la machine *Hazemeyer*) que nous avons traitée de sorte à faire ressortir les composantes hautes fréquences (liées à la désynchronisation notamment) du signal.

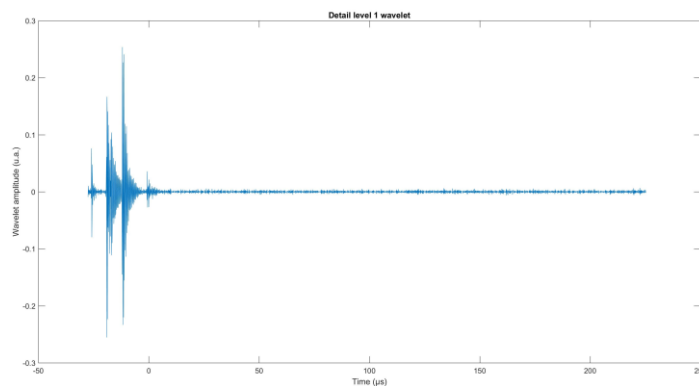


FIG. 9 –Décomposition en ondelettes de niveau 1 de l'intensité du courant circulant dans la bobine de tir tel que présenté figure 6a. Une décomposition de niveau 1 de type « détails » fait apparaître les composantes hautes fréquences d'un signal. On observe ici que les défauts de déclenchement sont clairement visibles puisqu'ils se manifestent ici par des composantes hautes fréquence de forte amplitude.

L'utilité du formalisme des ondelettes est également mise à profit pour le débruitage des signaux que nous recueillons et qui permet ainsi de les exploiter de façon très fine.

5 Conclusion

Ces différents aspects de nos études liées à la technologie par impulsions magnétiques montrent que certains défauts de la machine peuvent influencer directement sur la qualité des pièces formées ou soudées. En effet, lorsque le déclenchement des interrupteurs de puissance n'est pas réalisé correctement, il en résulte une désynchronisation des étages de puissance. Ceci mène à un pic d'énergie maximale bien plus faible qu'escompté et par conséquent à des soudures de mauvaise qualité puisque la vitesse d'impact et la pression magnétique générées en sont amoindries.

Par ailleurs, il a été montré par les techniques d'analyse temps-fréquence que certaines machines pouvaient souffrir de défauts d'optimisation engendrant des pertes énergétiques importantes dans un large domaine spectral. Cette énergie distribuée sur des fréquences élevées n'a aucune utilité puisque l'énergie utile se situe autour de la fréquence fondamentale, qui est typiquement de l'ordre de dizaines de kHz.

Nous proposons également une méthode de mesures de la déformation des tubes en cours de soudure basée sur la spectroscopie d'impédance. Cette méthode, de nature électrique, peut s'avérer efficace, simple de mise en œuvre et peu coûteuse, représentant ainsi une alternative fiable aux méthodes optiques existantes. Toutefois, des essais expérimentaux sont nécessaires pour conforter le formalisme théorique établi.

Enfin, la caractérisation électrodynamique de la machine permet d'obtenir un modèle de la machine en tant que circuit RLC dont les valeurs des paramètres sous-jacents sont mesurées expérimentalement. Il en résulte un cadre global interprétatif de la machine et laisse présager de pouvoir quantifier de façon satisfaisante les pertes résistives de sorte à pouvoir optimiser énergétiquement cette technologie.

Références

- [1] J. Broeckhove, Experimental research on magnetic pulse welding of dissimilar metals, Thèse, Université de Gand, Belgique, 2010.
- [2] G.S. Daehn, High Velocity Sheet Metal Forming: State of the Art and Prognosis for Advanced Commercialization, Ohio State University Press, 2002.
- [3] V. Psyk, D.Risch, B.L. Kinsey, A.E.Tekkaya, M. Kleiner, Electromagnetic forming – A review, *Journal of Materials Processing Technology* 211:5 (2011), 787-829.
- [4] R. Bouzerar, F. Bougrioua, I. Tekaya, N. Foy, M. Hamzaoui, V. Bourny, O. Durand-Drouhin, D. Jouaffre, D. Haye, Electrodynamics of magnetic pulse welding machines: global and local electrical analogues, *Proceedings of the 7th International Conference on High Speed Forming (ICHSF 2016)*, Dortmund, Germany.
- [5] A. Ben-Artzy, A. Stern, N. Frage, V. Shribman, O. Sadot, Wave formation in magnetic pulse welding, *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010), 397-404.
- [6] S. Kerroumi, Extraction des paramètres et classification dynamique dans le cadre de la détection et du suivi des défauts de roulements, Thèse, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2016.