

Capteur de courant à base de matériaux magnétoélectriques

Raphaël FILÂTRE, Vincent LOYAU, Frédéric MAZALEYRAT

Laboratoire SATIE CNRS UMR 8029, ENS Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif/Yvette.

RESUME – Cette étude porte sur un capteur de courant alternatif réalisé à partir de composite magnétoélectrique (ME) laminaire tricouche Ni/PZT/Ni avec des couches de Nickel électrodeposité. Afin de polariser le composite, un concentrateur de flux torique et des aimants permanents en ferrite de Baryum ont été dimensionné par éléments finis. Une électronique CMS servant de circuit de lecture de tension ME a été optimisée pour descendre en basses fréquences et immuniser le circuit aux perturbations électromagnétiques. Dans un premier temps, la dynamique du capteur est étudiée via la distorsion harmonique. Ensuite, une étude sur la résonance mécanique du composite est menée et un RLC série est utilisé comme première approche pour amortir cette résonance afin d'améliorer la bande passante.

Mots-clés—Magnétoélectrique, capteur de courant, électrodepositon, bande passante, simulation.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte de transition énergétique actuel, la production et la consommation d'électricité sont amenés à croître, notamment pour aller vers une électrification du parc automobile mondial. Cela va engendrer une hausse de la demande de capteurs de courant, tels que les capteurs à effet Hall, à magnéto-impédance géante, fluxgate, etc. Cependant, ces derniers du fait de leurs faibles sensibilités et leurs électroniques complexes sont relativement coûteux. Certaines technologies de capteurs émergentes telles que les capteurs de courant à base de composites magnéto-électriques (ME), ont de fortes sensibilités et pourraient pallier à ces problèmes. Ceux-ci sont composés d'une phase magnétostrictive couplé mécaniquement à une phase piézoélectrique. Ainsi, le passage d'un courant dans un fil va créer un champ engendrant une déformation de la phase magnétostrictive déformant à son tour la phase piézoélectrique, faisant ainsi apparaître une tension aux bornes de cette dernière. Dans les années 2010, les recherches autour de ces capteurs de courant se sont orientées vers l'obtention du meilleur effet ME possible en utilisant des matériaux à base de terres rares, tel que le terfenol-D [1-5]. Ces études sont généralement faites en sinus à 50Hz et en laboratoire dans des conditions idéales (sans perturbations électrostatiques). Or les capteurs de courants sont souvent utilisés dans des applications industrielles et dans des gammes de fréquences spécifiques. Une étude plus générale du capteur est donc nécessaire, et des composites sans terres rares sont à privilégier étant donné les éventuels problèmes d'approvisionnement. C'est pourquoi des capteurs de courants ME sont développés au SATIE en utilisant par exemple des ferrites, des amorphes, ou du Nickel électrodeposité en vue d'une utilisation dans des applications industrielles.

Les composites ME sont caractérisés par un coefficient magnéto-électrique direct qui est le rapport entre le champ

électrique obtenu et le champ magnétique appliqué. La réponse magnéto-électrique dépend essentiellement des propriétés des matériaux magnétostrictifs utilisés (Nickel électrodeposité, alliage amorphe, ferrite de Nickel fritté, etc...), ou encore ses dimensions (effet démagnétisant).

Aux vues des principes de fonctionnement de ces échantillons ME, il est possible d'obtenir deux types de capteurs de courant. Le premier est un capteur de courant ne pouvant mesurer que de l'alternatif avec une électronique réduite [6], et le second est un capteur de courant actif [7] permettant de mesurer le continu et l'alternatif basse fréquence, avec une électronique plus complexe. Le prototype que nous présenterons ici est un capteur de courant alternatif. Il vise des applications d'électronique de puissance, dont les formes d'ondes de courant sont spécifiques. Les résultats avec ces types de capteurs ME sont prometteurs, mais ils comportent encore de nombreuses limites, telles celles liées à la bande passante, la faible immunité aux perturbations électriques basse fréquence (Compatibilité Electro-Magnétique) et la dynamique.

La miniaturisation des échantillons permet d'augmenter la bande passante du capteur en rejetant à des fréquences plus élevées les résonances mécaniques. Ici, nous avons avantageusement utilisé des techniques d'électrodepositon compatible avec la fabrication d'échantillons de quelques mm² de surface. Ainsi, nous présenterons un capteur de courant ME que nous avons réalisé en partant de cette technique. On commencera donc par présenter la fabrication de l'échantillon ME. Ensuite une partie sera consacrée à la simulation du concentrateur de flux. On s'intéressera également à une prévision de la distorsion, puis à la bande passante du capteur.

2. DEPOT ELECTROLYTIQUE

Le dépôt électrolytique permet de déposer une couche de Nickel d'épaisseur voulue de chaque côté d'un échantillon de PZT de quelques mm² de surface, afin de former un tricouche Ni/PZT/Ni. L'intérêt de cette technique est qu'elle est compatible avec les techniques de gravure et de masques et peut être associée à une électronique également miniaturisée.

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif (figure 1) utilise simultanément deux contre-electrodes de Nickel, en regard des 2 faces de l'élément piézoélectrique (où il existe déjà 2 fines électrodes) sur lesquelles on fait les dépôts. La distance entre les contre-electrodes est de 4 cm et l'échantillon est placé au milieu. Le tout est plongé dans une solution de type « bain au sulfamate » avec une composition similaire à celle utilisé par Pan *et al* [8]. La densité de courant est choisie de manière à faire un compromis entre la vitesse de croissance et l'aspect du dépôt. Afin d'avoir

un réglage précis du courant, des résistances sont mise en série avec 2 sources de tensions pour obtenir des sources de courants (avec 2 ampèremètres pour régler deux courants d'environ 19mA/cm^2), le dépôt est ainsi effectué simultanément sur les 2 faces pendant un certain temps.

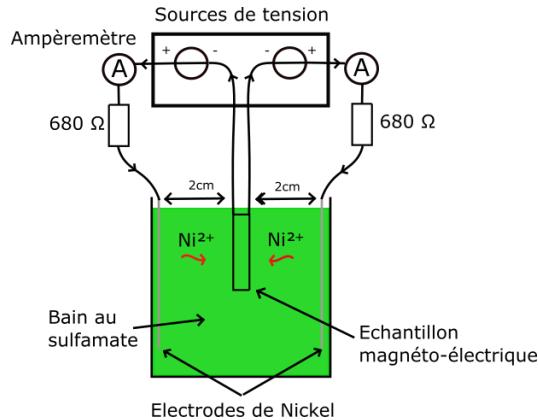


Fig. 1. Schéma d'un dispositif de dépôt électrolytique

2.2. Caractérisation magnétoélectrique

Chaque échantillon fabriqué est caractérisé pour déterminer ses effets ME. Pour obtenir la caractéristique ME de notre échantillon, un dispositif expérimental qui a été mis en place dans des travaux précédent est utilisé [9]. Le coefficient ME en couplage transverse auquel on s'intéresse est définie comme le rapport de l'amplitude du champ électrique mesuré et du champ alternatif appliqué pour un champ DC donné :

$$\alpha_{31} = \left(\frac{\partial E}{\partial H_{AC}} \right)_{H_{DC}} \quad (1)$$

Ainsi, l'effet ME est caractérisé par ce coefficient α_{31} en fonction du champ DC. Ce dernier est réglé par un électroaimant, et l'échantillon est placé dans son entrefer. Le champ AC est mesuré par de petites bobines, et la tension ME aux bornes du PZT est mesurée à l'aide d'un lock-in, permettant ainsi de connaître le champ électrique étant donné l'épaisseur de la couche piézoélectrique.

2.3. Résultats expérimentaux

La réponse magnétoélectrique obtenue avec un dépôt électrolytique dépend de l'épaisseur de Nickel et donc de la durée de dépôt. Afin d'avoir une idée de l'évolution de l'effet ME avec le temps de dépôt, des dépôts successifs de 1h30 sont réalisés avec un échantillon de PIC255 carré de 1cm^2 de surface, en caractérisant l'échantillon à la fin de chaque dépôt (figure 2). L'épaisseur de Nickel est de $300\mu\text{m}$ de chaque côté après 7h30 pour une densité de courant de 31 mA/cm^2 . La durée de 6h sera retenue par la suite pour avoir un maximum d'effet ME. Après 6h de dépôt, l'effet ME n'augmente que très peu, et finira par diminuer à cause des effets démagnétisant [10].

La valeur maximum du coefficient ME (qui correspond au maximum du coefficient piézomagnétique), ainsi que la valeur du champ H_{DC} associé, dépendent essentiellement de l'épaisseur de la couche de Nickel (qui influe sur le champ démagnétisant et le couplage mécanique). D'autres paramètres secondaires (telle la densité de courant de dépôt, l'acidité de la solution de sulfamate, etc...) vont jouer sur les propriétés mécaniques et magnétiques intrinsèques des couches de nickel via la porosité et la taille de grains. Ces couches doivent être lisses avec le moins de trous possibles pour éviter que la porosité perturbe les effets magnétiques [11].

Le prototype de capteur de courant qui est présenté dans ce papier est basé sur un tricouche Ni/PZT/Ni électrodeposité. L'élément piézoélectrique fait $0,5\text{mm}$ d'épaisseur et 20 mm^2 de surface. La couche de Nickel est de $150\ \mu\text{m}$ de chaque côté pour un dépôt de 6h (figure 3) et une densité de courant de 20 mA/cm^2 . La caractéristique ME complète est donnée figure 4 pour un couplage transverse. Sur cette courbe, un effet hystériétique est présent et 4 zones de fonctionnement sont possibles. On suppose pour le moment que l'on est sur la portion 1 de la caractéristique ME, on a alors un coefficient ME maximal qui est atteint pour un champ appliqué de $20,6\text{kA/m}$ (26 mT).

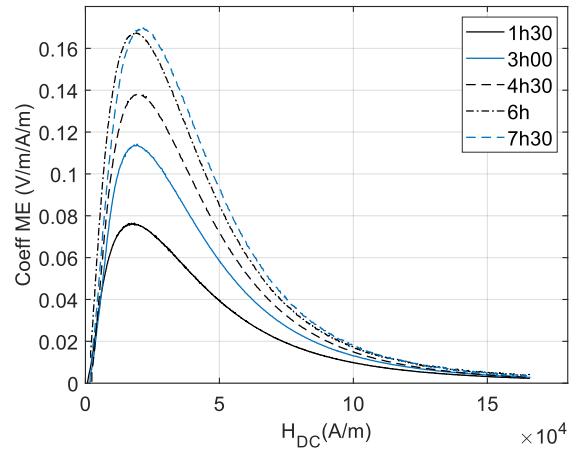


Figure 2. Evolution de la courbe ME en fonction du temps de dépôt, avec un échantillon de PIC255 carré de 1cm^2 .

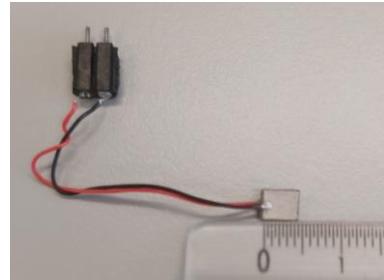


Figure 3. Tricouche Ni/PZT/Ni avec des couches de Nickel de $150\mu\text{m}$ électrodepositées sur un échantillon de PIC255 de $0,5\text{ mm}$ d'épaisseur et de surface 20 mm^2 .

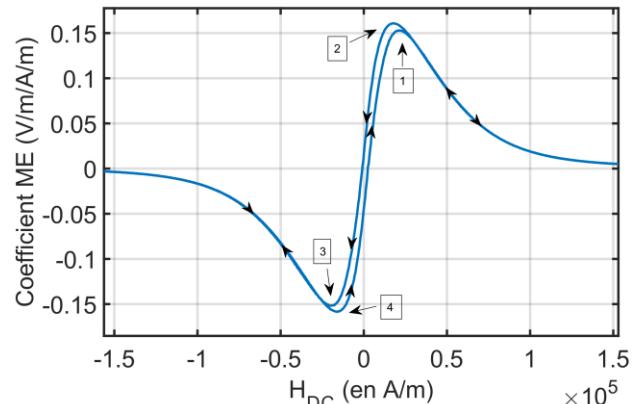


Figure 4. Caractéristique ME complète du tricouche Ni/PZT/Ni avec des couches de Nickel de $150\mu\text{m}$ sur un échantillon de PZT de $0,5\text{ mm}$ d'épaisseur et de surface 20 mm^2 .

3. SIMULATION

Pour réaliser un capteur de courant, il est nécessaire d'apporter un champ de polarisation H_{DC} pour se placer au maximum de l'effet ME déterminé précédemment. C'est pourquoi un concentrateur de flux en ferrite 3E27 est utilisé avec des aimants permanents en ferrite de Baryum permettant d'obtenir le champ de polarisation souhaité dans un entrefer où l'échantillon ME sera inséré.

Cependant, chaque type d'échantillon nécessite une valeur de champ de polarisation adaptée à ses caractéristiques ME. Donc, la géométrie et les caractéristiques du concentrateur de flux doivent être adaptés en conséquence. La mise en place d'une simulation sous le logiciel Ansys-Maxwell permet de faire varier différents paramètres du concentrateur de flux (figure 5) et ainsi déterminer à l'avance quelles sont la taille des aimants à insérer et la taille de l'entrefer à pratiquer dans le tore en ferrite. Cette simulation peut également servir à prédire quels vont être les effets de la circulation du courant à mesurer dans un câble électrique passant par le centre du concentrateur de flux, et on pourrait ainsi prédire la sensibilité du capteur complet.

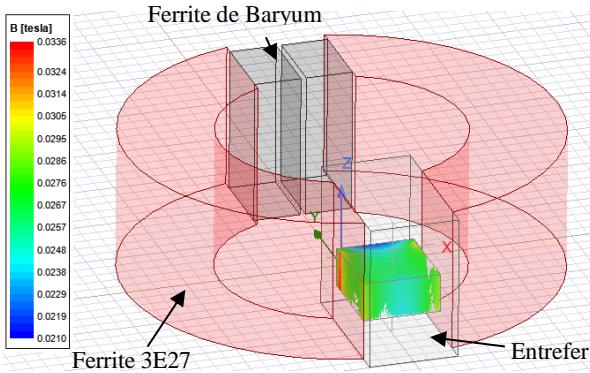


Fig. 5. Simulation sous Ansys-Maxwell du concentrateur de flux en ferrite 3E27 avec des aimants en ferrite de Baryum et un entrefer. La zone colorée correspond au champ B dans l'entrefer.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.1. Prototype de capteur de courant

Un prototype de concentrateur de flux a été réalisé à partir de la simulation, et le champ mesuré à l'emplacement de l'échantillon ME est bien autour de 26mT. L'échantillon ME (celui de la figure 3) est inséré à l'horizontal dans l'entrefer, et une électronique en CMS à base de préamplificateurs de charge en différentiel, fabriquée au laboratoire est connectée aux bornes de la phase piézoélectrique. Cet ensemble constitue le capteur de courant ME (figure 6).

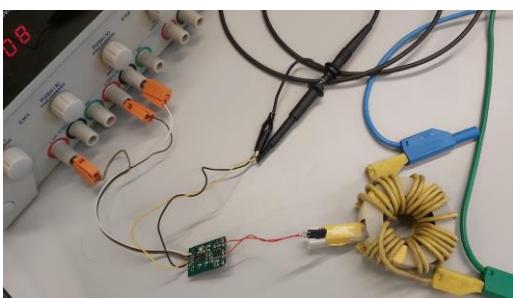


Fig. 6. Capteur de courant obtenu avec un tricouche Ni/PZT/Ni placé dans l'entrefer d'un concentrateur de flux, avec une électronique constituée de préamplificateur de charge en différentiel.

Pour pouvoir tester les limites en courant du capteur, il est nécessaire d'avoir une alimentation AC pouvant fournir des centaines d'ampères. Un GBF et un amplificateur audio (ayant une bande passante de 20Hz à 20kHz) sont utilisés, nous permettant d'aller jusqu'à 25A maximum. On enroule 24 spires autour du concentrateur de flux, nous permettant d'atteindre 600 A.tours. Un exemple de mesure est donné figure 7 où le courant mesuré par une sonde de référence (tektronix A622) est comparé avec le capteur de courant ME à 1kHz, et à 160A.tours. Le courant a été normalisé pour pouvoir comparer les formes de signaux, et on observe une bonne linéarité de la tension V_{ME} .

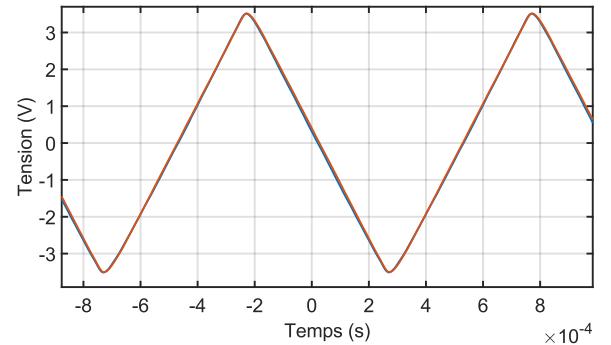


Fig. 7. Comparaison entre le courant mesuré par une sonde de référence tektronix A622 (en rouge) et la tension V_{ME} du capteur de courant ME (en bleu), à 1kHz, et à 160A.tours. Le courant a été normalisé pour pouvoir comparer les formes de signaux.

Pour déterminer la limite en courant du capteur, on mesure les harmoniques pour un courant sinusoïdal à 1kHz allant jusqu'à 600A.tours pour calculer le THD :

$$THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n I_k}} \quad (2)$$

Une comparaison a été faite (figure 8) entre le THD de la tension V_{ME} mesuré et le THD du courant mesuré par une sonde de référence (tektronix A622), sachant que la sonde mesure le courant au niveau du fil sans l'influence des 24 spires. Le THD de 1,5% mesuré à partir de la sonde de courant correspond à la distorsion apportée par l'amplificateur audio qui est non linéaire. Dans cette gamme de courant, on suppose que la sonde courant à un THD très faible. Ainsi, le THD obtenu pour la tension V_{ME} est en réalité probablement plus faible. Selon les applications, le THD requis peut varier, mais si l'on se donne par exemple une limite de THD de 3%, on peut alors avoir une dynamique allant jusqu'à 300A.

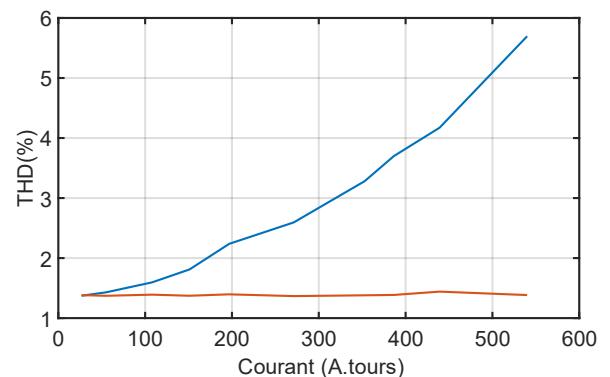


Fig. 8. Comparaison entre le THD de la tension V_{ME} (bleu) et le THD de la mesure avec une sonde de courant de référence Tektronix A622 (rouge).

4.2. Prédiction de la distorsion

A partir de la caractéristique ME d'un échantillon, il est théoriquement possible de remonter à la tension ME qu'on obtiendrait à ses bornes, permettant ainsi de prévoir la distorsion en utilisant la courbe ME autour du point de fonctionnement. De plus, on peut comparer cette tension V_{ME} obtenue avec celle mesurée expérimentalement, pour vérifier où on se situe sur la caractéristique ME et si le point de polarisation est bien celui choisi avec le dimensionnement. Un code a été développé sur Matlab afin de mettre en œuvre cette prédiction.

Le principe est le suivant. Pour prévoir la forme d'onde de la tension V_{me} , on part de la définition du coefficient magnétoélectrique :

$$\alpha_{31} = \left(\frac{V_{me}/d}{H_{AC}} \right) H_{DC} \quad (3)$$

Dans cette équation (Eq. (3)), l'épaisseur d de la phase piézoélectrique est connu et α_{31} pour un champ DC appliqué est connu grâce à la caractéristique ME de l'échantillon. Pour déterminer H_{AC} , le champ B a été mesuré dans l'entrefer sans l'échantillon en faisant varier un courant DC circulant dans les 24 spires pour déterminer si l'évolution du courant est bien linéaire et déterminer le champ B qui serait dû au passage d'un courant de 1A. Ainsi, le champ B est de 43,6 μ T pour 1A.tours et on en déduit la relation avec le courant I:

$$H_{ac} = \frac{I \cdot 43,6 \cdot 10^{-6}}{\mu_0} \quad (4)$$

En renversant l'équation 3, on obtient la tension V_{me} en fonction du courant et du coefficient ME :

$$V_{me}(t) = \alpha_{31} H_{DC} \cdot d \cdot \frac{I(t) \cdot 43,6 \cdot 10^{-6}}{\mu_0} \quad (5)$$

On peut alors théoriquement prévoir pour plusieurs formes de courant quelle serait la tension V_{me} mesurée à un point de polarisation donné (Eq. (5)), ce qui permettrait de prévoir à l'avance les performances du capteur.

Pour vérifier la prévision de la tension V_{me} , la portion 1 de la caractéristique ME a d'abord été utilisée, et le courant mesuré expérimentalement a été utilisé dans l'Eq. (4), pour vérifier si la tension obtenue correspond à celle mesurée expérimentalement. Plusieurs problèmes apparaissent, tout d'abord, l'amplitude de la tension V_{ME} expérimentale est supérieur d'un facteur d'environ 1,6 à la tension obtenue avec le code Matlab. Ensuite, si on normalise le courant de référence et les tensions V_{ME} obtenues par calcul et expérimentalement, on obtient une distorsion plus grande qu'expérimentalement pour le point de polarisation à 20,6 kA/m pour 432 A.tours. Lorsque l'on se place sur la portion 2 de la courbe et qu'on se place à 25kA/m sur Matlab, on a une distorsion plus proche de celle expérimentale (figure 9). Une distorsion similaire peut être également obtenu en utilisant une autre portion de la caractéristique ME avec des points de polarisation différents. Pourtant, à 162 A.tours, en se plaçant au point de polarisation et sur la portion 2 de la courbe, on a une distorsion similaire à celle obtenue expérimentalement.

Il est donc difficile de savoir sur quelle portion de la caractéristique ME on se situe et la distorsion est plus grande que ce que l'on observe expérimentalement. De plus, plus le courant augmente, plus la prévision de distorsion s'éloigne de celle obtenue expérimentalement.

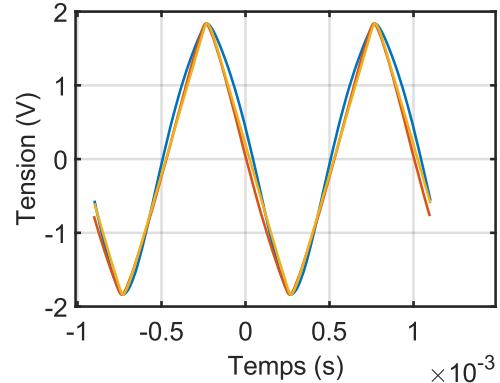


Fig. 9. Comparaison à 433 A.tours de la distorsion entre le courant de référence (en jaune), et les tension V_{ME} expérimentales (orange) et calculées (bleu), qui ont été normalisés pour avoir la même amplitude. $H_{DC} = 25 \text{ kA/m}$

Cela peut s'expliquer par les conditions de la caractérisation ME de l'échantillon. En effet, dans le dispositif de caractérisation, l'échantillon est soumis à un champ homogène comme les pôles de l'électroaimant sont suffisamment distants. En revanche, dans l'entrefer du concentrateur de flux, le champ est inhomogène. L'entrefer fait 11mm, alors que l'échantillon fait 4mm de largeur, les lignes du champs appliqués vont alors se concentrer dans l'échantillon. De plus, la proximité des pôles de l'entrefer du concentrateur de flux va réduire le champ démagnétisant produit par l'échantillon. Ainsi, le champ interne de l'échantillon est probablement plus grand que prévu, ce qui peut décaler le point de fonctionnement prévu lors du dimensionnement du concentrateur de flux.

Finalement, les développements sur la prévision de la distorsion permettent d'avoir une première approche sur la compréhension de l'effet ME pendant le fonctionnement du capteur. On peut au moins connaître une première plage de courant sur laquelle on sait que la distorsion est bonne, sachant qu'elle sera en réalité meilleure que nos prévisions. De plus, cela permet de déterminer quels sont les échantillons les plus prometteurs sans avoir à dimensionner de concentrateur de flux.

Il faudra dans l'avenir prendre en compte le champ démagnétisant lors de la caractérisation ME pour obtenir le coefficient ME en fonction du champ DC interne. Or ce n'est pas évident à prendre en compte pour plusieurs raisons. Premièrement, l'épaisseur de la couche de Nickel est mal maîtrisée, elle a une certaine porosité et elle est irrégulière. Deuxièmement, on ne connaît pas la susceptibilité du Nickel déposé de manière électrochimique, puisqu'elle peut être différente de la susceptibilité du Nickel obtenu par des procédés de métallurgie.

5. BANDE PASSANTE DU CAPTEUR AC

Hors résonance mécanique, l'impédance de sortie série du capteur de courant (qui est équivalente à la capacité statique C_0 de l'élément piézoélectrique) est associée à une impédance d'entrée habituellement résistive du circuit électronique qui va lire la tension image du courant. Ce qui est équivalent à un filtre passe haut qui va supprimer la partie continue et atténuer la partie alternative basse fréquence du signal. Ces propriétés capacitatives nous ont incités à nous tourner vers la mise au point d'une électronique basée sur des préamplificateurs de charge (en mode différentiel) permettant ainsi de diminuer la sensibilité du capteur aux perturbations extérieures.

En haute fréquence, le capteur est limité par la première fréquence de résonance mécanique de l'échantillon ME qui se

situe autour de 450 kHz (mais qui commence déjà à influer à partir de 300kHz).

Selon la géométrie de l'échantillon et le couplage mécanique entre ses couches magnétostrictives et piézoélectriques, il peut y avoir plusieurs résonances [12]. Lorsque l'on trace la fonction de transfert du capteur avec en entrée le courant et en sortie la tension V_{ME} (figure 10), on observe une première résonance à 450 kHz et un creux dans la fonction de transfert à 320 kHz. La qualité du couplage mécanique de l'échantillon ME présenté est plutôt bonne, ce qui expliquerai pourquoi on a une résonance principale à 450kHz. En revanche, on ne sait pas expliquer ce qui se passe à 320kHz.

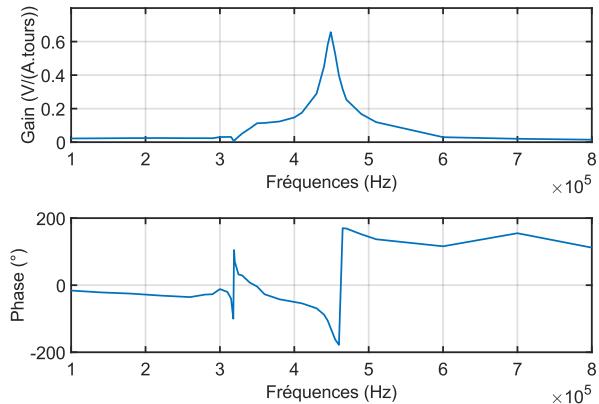


Fig. 10. Fonction de transfert du capteur avec en entrée, le courant mesuré avec une sonde tektronix TCPA300 et en sortie la tension ME entre 100kHz et 800kHz

La réponse du capteur à un échelon de courant permet de mettre en évidence les résonances pouvant apparaître lorsque les fronts de montée sont raides. Un exemple est donné figure 11a où la tension V_{ME} est mesurée pour un créneau de courant de 200mA à 1kHz. Des oscillations décroissantes sont présentes, et sont principalement dues à la résonance à 450kHz quand on regarde la FFT (figure 11b). Dans un premier temps, on met en place un amortissement «électronique» passif avec un RLC série que l'on place en parallèle de l'échantillon ME. Les caractéristiques que l'on peut régler à l'aide R, L et C sont la pulsation de coupure et le facteur de qualité :

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (6)$$

$$Q = \frac{\omega_r \cdot L}{R} \quad (7)$$

Le choix de L et de C dans l'Eq (6) permet de se placer à 450kHz avec $L=300\mu\text{H}$, $C=400\text{pF}$, tandis que le choix de la résistance permet de régler le facteur de qualité (Eq. (7)). Plus il sera grand, plus l'atténuation à la fréquence de résonance sera grande. Il faut trouver une valeur de R telle que l'atténuation soit bonne autour à la résonance et autour. Si Q est trop grand, l'atténuation se fera sur une bande très restreinte autour de la résonance et cela n'atténuerait pas ce qui se passe autour de la résonance. En prenant en compte la résistance série de l'inductance utilisée, $R=10,7 \Omega$. A basse fréquence, le RLC à un comportement capacitif et a donc une grande impédance. A la fréquence de résonance, l'effet capacitif compense l'effet inductif et le RLC est alors équivalent à une résistance R. L'énergie mécanique va alors être dissipée dans la résistance.

Ainsi, sur la figure 11c on observe une forte atténuation des oscillations et sur la figure 11d c'est bien la résonance à 450 kHz qui a été atténuée. La décroissance est toujours exponentielle

mais est cette fois ci plus raide. Pour améliorer l'amortissement de cette résonance, il faudrait augmenter le facteur de qualité Q. Or on ne peut jouer que sur la valeur de R si on veut garder la fréquence de coupure identique. Il faudrait donc diminuer la valeur de R, or dans le cas présent, le minimum de R est limité par la résistance série de l'inductance utilisée.

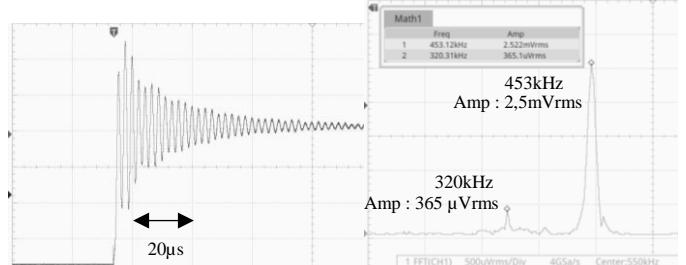
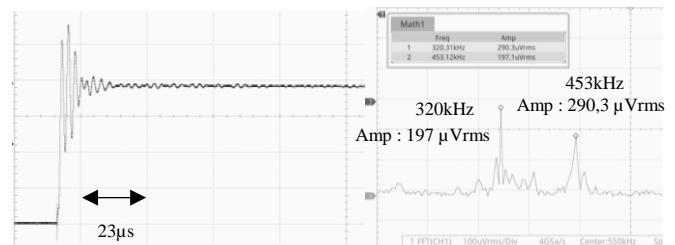


Fig. 11. (a) Tension ME mesuré pour un créneau de courant de 200mA à 1kHz avec les préamplificateurs de charge et sans le filtre RLC (b) FFT de la tension V_{ME} sans le filtre RLC



(c) Tension ME mesuré pour un créneau de courant de 200mA à 1kHz avec les préamplificateurs de charge et avec le filtre RLC. (d) fft de la tension V_{ME} sans le filtre RLC

6. CONCLUSIONS

La technique d'électrodéposition est prometteuse pour la fabrication des capteurs ME avec tous les avantages que ça apporte en termes de miniaturisation et d'utilisation de techniques issues de la microélectronique. La conception du concentrateur de flux peut être optimisé grâce à une simulation sous Ansys-Maxwell, et permet ainsi d'exploiter l'optimum des effets ME. Cependant, la comparaison entre la prédition de la tension V_{ME} et la tension mesurée expérimentalement a permis de mettre en évidence qu'il est difficile de déterminer précisément sur quelle partie de la courbe ME on se situe, et quel est réellement le point de polarisation, sachant que l'on a considéré dans un premier temps que le champ était homogène dans l'entrefer et un couplage entre le ferrite 3E27 et l'échantillon n'était pas pris en compte. La prévision de la distorsion de la tension V_{ME} est une première approche permettant de mieux comprendre les effets ME lors du fonctionnement du capteur et d'avoir une première idée sur la distorsion du capteur, qui est surestimée dans la prévision. Concernant la bande passante, la fréquence de résonance a pu être repoussé grâce à une miniaturisation de nos échantillons, mais en contrepartie C_0 diminue et augmente la fréquence de coupure basse de la bande passante. L'amortissement avec un RLC série en première approche a permis une bonne atténuation des oscillations sur les fronts de montées raides. On envisage par la suite de continuer à explorer cet amortissement électronique pour augmenter l'atténuation et de mettre en place un amortissement mécanique. Par la suite, une étude CEM pourra être mise en œuvre afin de pouvoir utiliser le capteur de courant dans des applications d'électronique de puissance fortement perturbées électromagnétiquement.

7. REFERENCES

- [1] Dong, J.G. Bai, J. Zhai, J.F. Li, G.Q. Lu, D. Viehland, S. Zhang, T.R. Shrout, Circumferential-mode, quasi-ring-type, magnetoelectric laminate composite-a highly sensitive electric current and or vortex magnetic field sensor. *Appl. Phys. Lett.* 86(18), 182506 (2005)
- [2] C.M. Leung, S.W. Or, S. Zhang, S.L. Ho, Ring-type electric current sensor based on ring-shaped magnetoelectric laminate of epoxy-bonded Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92} short-fiber/NdFeB magnet magnetostrictive composite and Pb(Zr, Ti)O₃ piezoelectric ceramic. *J. Appl. Phys.* 107(9), 09D918 (2010)
- [3] J. Zhang, P. Li, Y. Wen, W. He, A. Yang, C. Lu, J. Qiu, J. Wen, J. Yang, Y. Zhu, M. Yu, High-resolution current sensor utilizing nanocrystalline alloy and magnetoelectric laminate composite. *Rev. Sci. Instrum.* 83(11), 115001 (2012)
- [4] J. Zhang, P. Li, Y. Wen, W. He, A. Yang, C. Lu, Packaged current-sensing device with self-biased magnetoelectric laminate for low-frequency weak-current detection. *Smart Mater. Struct.* 23(9), 095028 (2014)
- [5] X. Yu, G. Lou, H. Chen, C. Wen, S. Lu, A slice-type magnetoelectric laminated current sensor. *IEEE Sens. J.* 15(10), 5839 (2015)
- [6] A. Aubert, V. Loyau, G. Chaplier, F. Mazaleyrat, M. Lobue. Enhanced magnetoelectric voltage in ferrite/PZT/ferrite composite for AC current sensor application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Springer Verlag, 2018.
- [7] « Capteur de courant AC/DC basé sur un matériau magnétoélectrique composite ». V. Loyau, F. Mazaleyrat, G. Chaplier. Brevet n° FR1912406 enregistré le 12/11/2021.
- [8] D. A. Pan, Y. Bai, W. Y. Chu, et L. J. Qiao, « Ni-PZT-Ni trilayered magnetoelectric composites synthesized by electro-deposition », *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 20, n° 2, p. 025203, janv. 2008, doi: 10.1088/0953-8984/20/02/025203.
- [9] Alex Aubert. Synthèse, caractérisation et modélisation de matériaux multiélectriques (magnétoélectriques) composites massifs. Energie électrique. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACLN036. tel-01909416
- [10] V. Loyau, A. Aubert, M. LoBue, et F. Mazaleyrat, « Analytical modeling of demagnetizing effect in magnetoelectric ferrite/PZT/ferrite trilayers taking into account a mechanical coupling », *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 426, p. 530-539, mars 2017, doi: 10.1016/j.jmmm.2016.11.125.
- [11] J. A. Brug and W. P. Wolf. Demagnetizing fields in magnetic measurements. ii. bulk and surface imperfections. *Journal of Applied Physics*, 57(10) :4695–4701, 1985.
- [12] D. A. Filippov, U. Laletsin, et G. Srinivasan, « Resonance magnetoelectric effects in magnetostrictive-piezoelectric three-layer structures », *J. Appl. Phys.*, vol. 102, n° 9, p. 093901, nov. 2007, doi: 10.1063/1.2803656