

Conception silencieuse d'une inductance de lissage associée à un convertisseur MLI.

M. Rossi¹, B. Iamamura¹, M. Hecquet¹, V. Lanfranchi², S. Recorbet³, F. Tridon⁴

¹L2EP, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

²LEC, Laboratoire Electromécanique EA1006, Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France

³Alstom-Transport, Tarbes, France / ⁴TRBV, Transrail, Lyon, France

mathieu.rossi@ec-lille.fr; michel.hecquet@ec-lille.fr; vincent.lanfranchi@utc.fr

RESUME – *Ce papier a pour objectif de donner une réponse sur les origines du bruit des selfs. Ainsi, afin de définir une conception silencieuse d'une inductance alimentée par MLI, la mise en évidence des phénomènes générant le bruit électromagnétique est présentée. Différents matériaux au niveau des entrefers et différentes topologies sont détaillés et comparés en vue de réduire les vibrations et le bruit d'origine magnétique. Enfin, une comparaison des efforts de Maxwell et de magnétostriction est fournie. On montrera en ayant fixé le choix des matériaux qu'il est possible de trouver un bon compromis entre la hauteur du composant et l'épaisseur des entrefers.*

Mots-clés— *Inductance de lissage, bruit magnétique, efforts de Maxwell et de magnétostriction, matériau, cales d'entrefer, mesures vibratoires.*

1. INTRODUCTION

A l'heure actuelle, les cahiers des charges deviennent de plus en plus drastiques et le confort acoustique est une des contraintes importantes dans le domaine du ferroviaire. En effet, dans certains cas, pendant les phases de démarrage, le bruit global émis par un train est dominé par le bruit d'origine magnétique. Les composants magnétiques tel que le transformateur, les inductances de lissage (self) ou encore les moteurs associés à leurs convertisseurs sont à l'origine de ce bruit. Le niveau maximal n'est pas forcément trop important mais son caractère tonal (raie émergente du spectre de plus de 10 dB) est pénalisé par les normes en vigueur.

Ce critère est intégré dès la phase de conception des composants d'une chaîne de traction comme les inductances de lissage associées à leurs convertisseurs. Il est aussi indispensable de prendre en compte de nombreux phénomènes en lien avec l'alimentation électronique : effets de peau et de proximité, effet thermique et point chaud, comme le bruit émis d'origine électromagnétique tout en respectant la valeur de l'inductance en fonction de la fréquence (gabarit imposé par le cahier des charges) [1-4].

De plus, l'utilisation de l'électronique de puissance a augmenté les taux d'harmoniques et l'apparition de composante continue, ce qui accroît le bruit généré par les différents composants magnétiques comme les transformateurs

et selfs. Dans le cas ferroviaire, il s'avère qu'une des grandes sources de bruit soit d'origine électrique, et parmi ces sources les selfs sont pointées du doigt [5] comme le montre la figure 1 lors d'un relevé sur un coffre, appelé convertisseur auxiliaire, pour le ferroviaire.

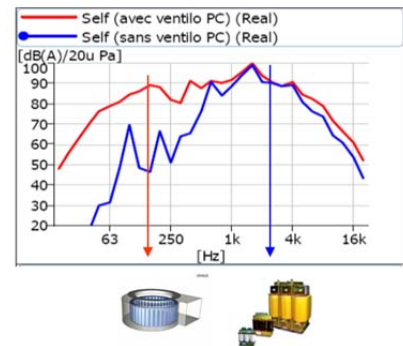


Figure 1: Bruit des selfs dans un convertisseur

Ces inductances de lissage sont indispensables au bon fonctionnement dans une chaîne de traction. Elles sont, généralement, constituées de nombreux entrefers répartis au niveau des colonnes horizontales sous les bobines (figures 2 et 4). Les forces de Maxwell au niveau de ces entrefers mais aussi les effets de magnétostriction sont les causes principales de la déformation de la structure et sont à l'origine du bruit magnétique (figure 2).

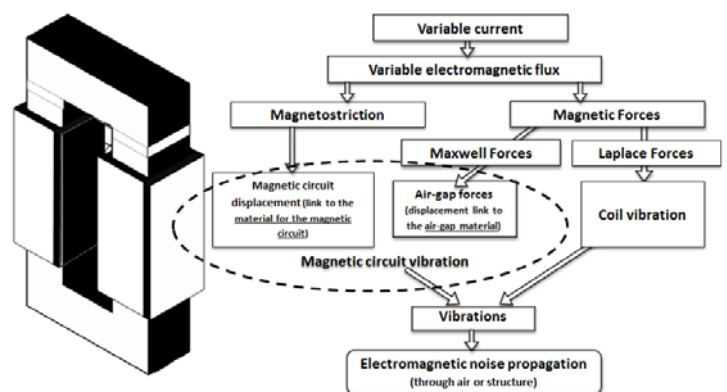
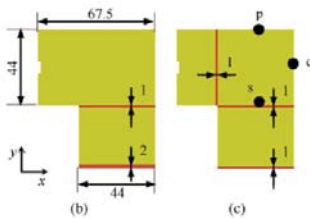


Figure 2: Origine du bruit et des vibrations d'origine magnétique

Quelques papiers [6-7] donnent différentes solutions dans le but de réduire le bruit d'origine magnétique pour des structures de faible puissance (figure 3).

En choisissant des matériaux différents au niveau des entrefers (variation du module de Young) ou en répartissant différemment ces entrefers, on a la possibilité de modifier la déformée opérationnelle de la structure [6]. Ce papier montre une atténuation des vibrations et du bruit en augmentant la dureté des cales mais aussi en changeant la répartition des entrefers, c'est-à-dire, en positionnant une partie des entrefers au niveau de la colonne verticale (figure 3). En effet, sur ces structures, le mode d'extension (proche du mode de respiration : cas du mode 0) est le plus gênant au niveau acoustique [8]. Ce phénomène sera rappelé dans notre papier. Ainsi le fait de réduire les efforts suivant les colonnes peut permettre une limitation des vibrations et du bruit. Pour exemple, le papier [7], pour des selfs de faible puissance, présente une forme triangulaire (figure 3) modifiant ainsi la réponse de la structure et pouvant permettre en fonction de la fréquence d'alimentation MLI de réduire le bruit. Malheureusement, dans ce cas, le bobinage et l'assemblage de la structure peuvent être plus complexes à réaliser.



Cas 1: 2 topologies avec modification de la répartition des entrefers [6]



Cas 2: Self triangulaire [7]

Figure 3: Nouvelle configuration d'inductances en vue de réduire le bruit d'origine magnétique

Notre étude se focalisera sur des selfs de moyenne puissance exploitées dans le domaine du ferroviaire. Les composants d'une chaîne de traction ont des fréquences de découpage relativement faible, de l'ordre de 1kHz. Ainsi, une alimentation MLI mais aussi sinusoïdale sera exploitée pour des fréquences variant de 50 and 1 kHz.

Le but de notre étude est dans un premier temps d'analyser les origines du bruit magnétique. Puis, dans un second temps, afin de réduire le bruit, notre objectif sera de montrer que le fait d'augmenter la dureté des cales d'entrefer n'est pas toujours bénéfique, contrairement au papier [6]. En effet, il faut prendre en considération la hauteur de la colonne, donc du fer. Si celle-ci est importante, nous montrerons que l'effet magnétostrictif devient supérieur aux effets de Maxwell dans les entrefers. On démontrera ainsi la nécessité d'un bon compromis entre dimensions de la structure, répartition des entrefers, dureté des cales, ainsi que les efforts de Maxwell et de magnétostriction.

Sur cet effet de magnétostriction, de nombreux papiers existent sur l'étude microscopique des phénomènes, sur la

caractérisation des matériaux mais aussi sur l'intégration la caractéristique de déformation dans des outils E.F. [4], [9-11].

On montrera aussi que le mode de déflexion verticale de la structure est le plus important par des mesures expérimentales en mode libre (sans alimentation) et mode forcé (avec une alimentation électrique).

2. DESCRIPTION DES INDUCTANCES ET DU BANC D'ESSAI

Plusieurs structures ont été réalisées avec deux répartitions des entrefers (structures 1 et 2 : figure 4). Un prototype sans entrefer (structure 3) a aussi été réalisé afin d'effectuer une mesure des efforts magnétostrictifs. Sur ces deux structures (1 et 2), on peut aisément changer le type de matériau utilisé au niveau des entrefers.

Le poids et les dimensions des 3 structures sont rigoureusement identiques avec des tôles identiques (poids de 50kg). Le serrage des structures est réglé à 30N. De plus, les bobines ne sont pas solidaires de la structure. Ces prototypes sont excités électriquement par un onduleur monophasé piloté sous dSPACE (figure 5) permettant de générer différentes stratégies MLI. Nous avons aussi effectué une analyse des modes propres de la structure associés à leur fréquence de résonance.

Dans ce papier, nous présenterons uniquement une alimentation sinusoïdale à fréquence variable de 0 à 1kHz. La fréquence de découpage a été choisie à plus de 10kHz afin d'imposer dans un premier temps une onde sinusoïdale à la structure. Par contre, cette onde a bien la fréquence principale qui varie entre 0 et 1kHz.

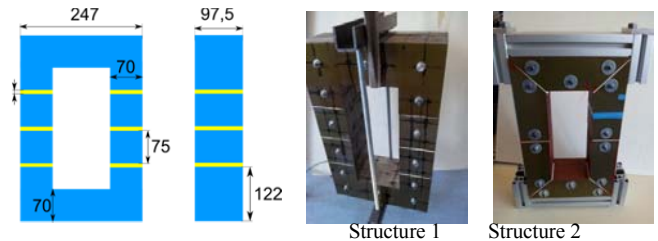


Figure 4: Structures réalisées

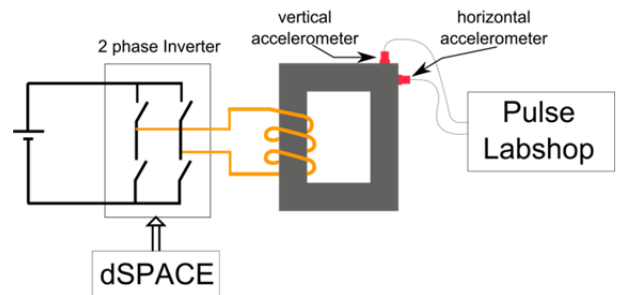


Figure 5: Banc expérimental et mesures vibratoires.

Sur chaque prototype, une bobine exploratrice permet d'évaluer l'induction imposée. Cette induction sera maintenue constante sur chaque structure permettant ainsi de les comparer. De plus, des mesures électriques ont été effectuées ainsi que la valeur de l'inductance afin de valider le cahier des charges (inductance quasi-constante sur la plage de fréquence).

Dans un premier temps, avant d'effectuer des mesures électrique et vibratoire sur la structure, nous allons déterminer les modes propres de la structure étudiée en réalisant une analyse modale expérimentale (excitation par un marteau de

choc) et une analyse modale opérationnelle en exploitant le courant électrique pour exciter la structure.

3. ANALYSE MODALE ET DEFORMEE OPERATIONNELLE.

Une première étude mécanique a été réalisée nous permettant d'observer les résonances de la structure où l'on retrouve dans les 3 cas un mode de respiration (déflexion verticale de la structure). L'outil « Pulse » de chez Bruel & Kjaer est exploité afin d'obtenir les paramètres modaux de la structure.

La première analyse, appelée analyse modale expérimentale (AME), demandent à faire une étude en libre – libre : l'objet doit être suspendu et sera excité par un marteau de choc. Alors que l'ODS (Operational Deflection Shape ou déformée opérationnelle), contrairement à l'AME, utilise les courants électriques comme excitation de la structure. En parallèle, un outil reposant sur la méthode des éléments finis (Ansys) est utilisé et vient valider les résultats.

a) Analyse modale expérimentale.

Dans un premier temps, une analyse modale expérimentale sera conduite sur la structure « solide » (structure 3). Puis, nous allons comparer celle-ci avec nos structures à entrefer. Une comparaison avec un modèle éléments finis 2D est aussi fourni.

Pour la mesure expérimentale, les mesures sont appliquées sur un maillage très fin de la structure afin de visualiser l'ensemble des modes (figure 6). Nous présentons la réponse en fréquence (FRF : fonction de réponse en fréquence) sur chaque nœud du maillage en gris et en rouge, la RMS FRF est calculée dans le but d'extraire les résonances. Celles-ci sont clairement visibles et marquées sur la figure : la 1^{ère} est observée à 1636 Hz.

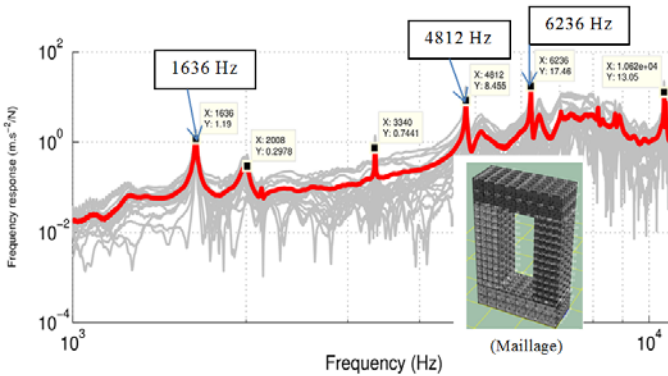


Figure 6: Réponse en fréquence de la structure 3 pour différents points du maillage

La déformation pour chaque résonance est présentée ci-dessous sur la figure 7 et le mode de respiration (ou de déformation verticale) est observable à 4821 Hz et 4964 Hz pour le calcul E.F. (figure 8).

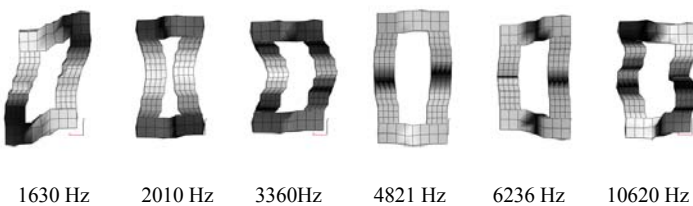


Figure 7: Analyse modale expérimentale obtenue sous Pulse

L'étude E.F. exploite l'outil Ansys en 2D et considère un matériau isotrope avec un module de Young de 210 Gpa, un

coefficient de Poisson de 0.3 et une densité de 7650 kg/m3. Les déformées modales associées à chaque fréquence sont identiques avec un maximum d'erreur de 3 % (figure 8).

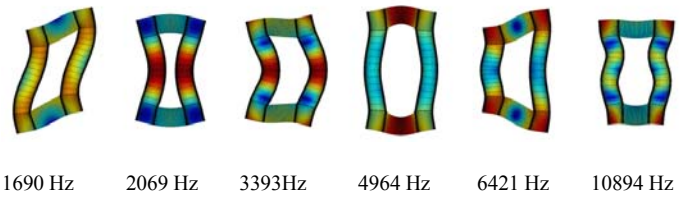


Figure 8: Analyse modale obtenue par la MEF

Impact des entrefers:

Les entrefers sont placés au niveau des colonnes : 3x2 mm par colonne (structure 1). Une analyse modale est faite dans la zone de fréquence de 0 à 3,2kHz. Plusieurs résonances apparaissent à basse fréquence dont le mode de respiration contrairement au cas précédent : les déformées sont fournies figure 9. Plusieurs déformées sont comparables au cas précédent mais les fréquences sont nettement plus faibles et les modes apparaissent dans un ordre différent. De plus, le mode de respiration n'apparaît pas clairement mais existe aux fréquences $f = 645$ et 795 Hz, nous parlerons plutôt de déformations verticales.

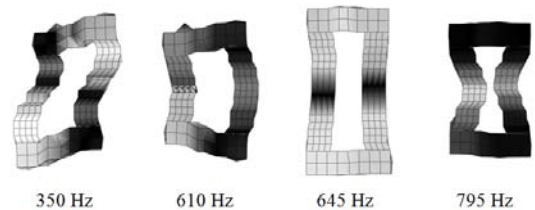


Figure 9: Analyse modale expérimentale structure 1 avec entrefers (Déformée et fréquence de résonance associée)

L'analyse modale par E.F. est donnée figure 10 pour la même configuration avec des fréquences et déformées associées en bonne correspondance avec l'expérimentale (erreur < à 6%).

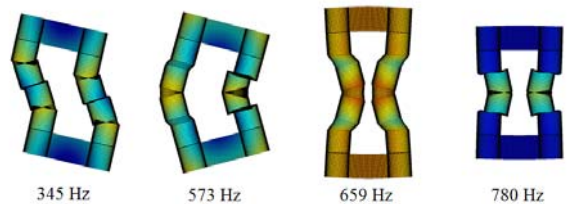


Figure 10: Analyse modale structure 1 par E.F.

L'étude mécanique qui a été réalisée avec le marteau de choc nous a permis d'observer les résonances de la structure où l'on retrouve **dans les 3 cas un mode de respiration** ou dans certains cas un mode équivalent de déformation verticale. Ces fréquences de résonance peuvent être excitées par une force d'origine magnétique.

b) Analyse modale opérationnelle (structure 1)

Une autre approche est proposée afin d'observer les fréquences de résonances de la structure mais aussi les déformées en exploitant l'alimentation des bobines avec une fréquence variable. Pour cela, une alimentation à fréquence variable et à U/F constant est appliquée. Cette alimentation génère une onde quasi-sinusoïdale avec une fréquence

d'alimentation variant dans la gamme 50Hz – 1kHz : les forces ont ainsi une fréquence de 2kHz au maximum. De plus, le courant appliqué est un courant constant excepté à très basse fréquence.

Les mesures ont permis de démontrer l'importance du mode d'extension de la structure visible sur la figure suivante située à 820Hz pour un type de cales (mat de verre) placé au niveau des entrefers (figure 11). Sur cette figure, on présente la déformation verticale qui est nettement supérieure pour la plupart des fréquences à la déformation horizontale (accéléromètre positionné sur le côté de la colonne). Cette analyse opérationnelle confirme les 2 déformées obtenues précédemment des résonances à 320 Hz et à 820 Hz (légèrement inférieur à 800Hz sur l'AME).

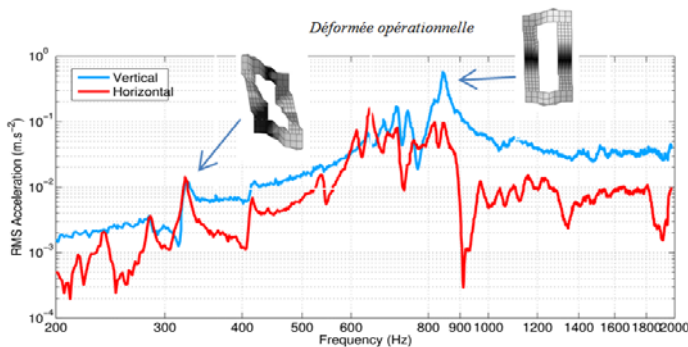


Figure 12: Analyse modale opérationnelle

c) Conclusion sur l'analyse modale

En conclusion sur cette partie, nous montrons que la décomposition de la structure en morceaux (structures 1 et 2) atténue fortement les fréquences de résonance. Nous avons ciblé la fréquence de résonance du mode de déformation verticale autour de 700Hz à 800Hz car il correspond à la déformation apportant le plus de vibrations et de bruit, point démontré par la suite. On verra par la suite que le type de matériau placé aux niveaux des entrefers a aussi un impact non négligeable sur les fréquences de résonance.

Sur nos 2 analyses pour nos configurations, l'analyse en opérationnelle s'est avérée plus facile à mettre en œuvre et a fourni des résultats similaires à l'AME. En fonction des dispositifs, cela peut s'avérer plus complexe, les bobines pouvant être gênantes pour la mesure vibratoire sur la structure. Dans notre cas, celles-ci ne sont pas trop proches de la structure.

4. MESURES VIBRATOIRE ET ACOUSTIQUE.

Afin d'observer la réponse dynamique de la structure, un "sweep" en fréquence de 0 à 1 kHz est appliqué via notre carte Dspace (figure 5) sur une des inductances, la structure 1 avec 6 entrefers. Le spectrogramme du courant (FFT) est montré sur la figure 13 où l'on peut observer une raie principale d'amplitude quasi-constante à partir de 200Hz jusqu'à 1kHz. On peut aussi remarquer l'apparition d'harmoniques d'amplitude très faible en lien avec l'apparition d'une composante continue générée par notre onduleur Semikron et sa loi de commande.

A basse fréquence, la résistivité du montage étant prédominante, il nous faudrait changer notre loi de commande en U/F afin de conserver une amplitude constante.

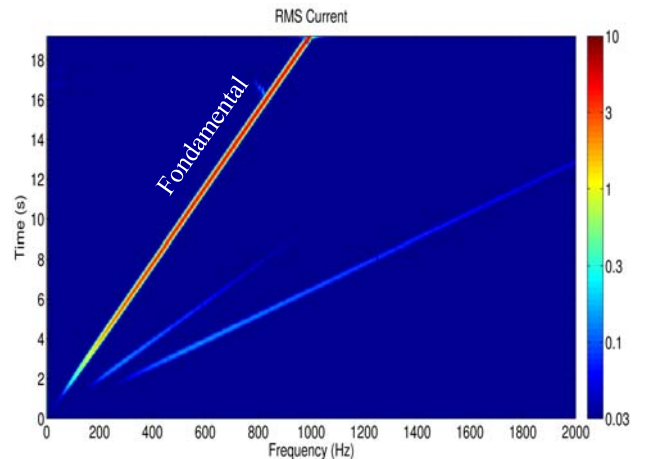


Fig. 13: Spectrogramme du courant imposé (variation de 0 à 1kHz)

Comme les forces magnétiques sont proportionnelles au carré de l'induction, on retrouve bien sur le graphe ci-dessous une raie à 2f, le maximum est à 2kHz. Avec l'existence de la composante continue créée par notre convertisseur, on retrouve aussi une raie à la même fréquence que celle des courants. Sur la figure 14, le spectrogramme de l'accélération verticale d'une colonne est représenté avec 2 raies à f et à 2f.

La réponse vibratoire montre sur la figure 14 que le mode à 820Hz est le plus important en termes d'accélération. Une mesure acoustique a aussi été réalisée (microphone situé à 1m à la verticale de la self). Deux résonances apparaissent visiblement autour de 600 à 800Hz et sont liées aux modes de déformations verticales (proche du mode de respiration) qui est le mode le plus gênant au niveau acoustique.

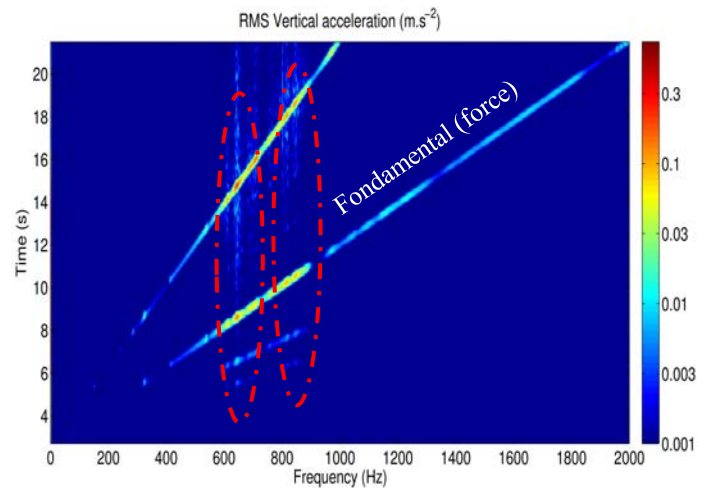


Figure 14: Spectrogramme de l'accélération verticale de la colonne

Une mesure de la pression acoustique ci-dessous nous donne les pics sur les mêmes fréquences et montre l'importance du mode dit de respiration ou mode de déformation verticale (appelé mode 0 sur les machines électriques).

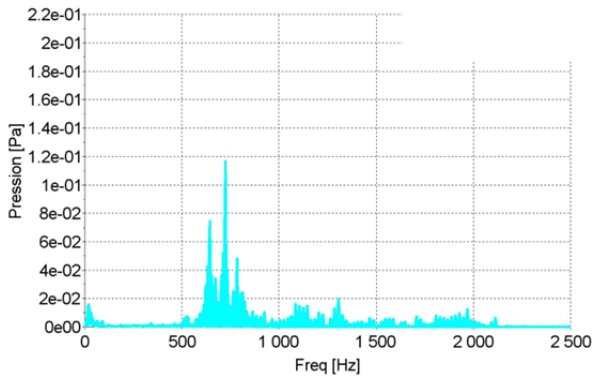


Figure 15: Mesure de la pression acoustique (Fréquences de 0 à 1 kHz)

En conclusion sur cette première partie d'analyse vibro-acoustique de nos structures, **seul le mode 0 en lien avec la déformation verticale du circuit magnétique est important.** Il faut rappeler que nos bobines n'ont pas d'interaction avec le circuit magnétique. Nous avons pu valider ce point avec différents cales d'entrefer mais aussi avec différentes épaisseurs d'entrefers.

5. MODIFICATIONS DE LA STRUCTURE EN VUE DE REDUIRE LE BRUIT

Suite à notre analyse des phénomènes électrique et vibro-acoustique d'une self, deux pistes ont été envisagées pour réduire le niveau acoustique : une modification de la structure avec une répartition des entrefers au niveau de la colonne horizontale (figure 3 : cas 1) et une modification de la nature des cales d'entrefer.

Le premier point est présenté dans l'article [8] et donne les mêmes conclusions que l'auteur [6]. On peut diminuer le niveau acoustique en répartissant les entrefers. Seul le second point sera détaillé dans cet article.

Modification de la nature des cales d'entrefer

Trois types de matériaux ont été testés dans un premier temps sur la structure 1, d'un matériau relativement dur équivalent à de la « mat de verre » (module de Young = 24GPa) à un matériau mou mais garantissant une très faible variation de la self. Les réponses en fréquence jusqu'à 2kHz sont données sur la figure 16.

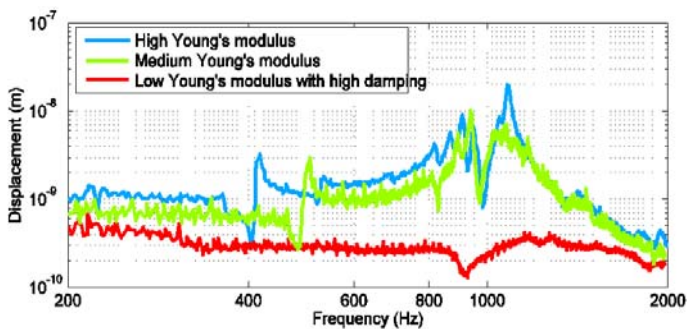


Figure 16: Mesures des vibrations avec différents matériaux au niveau des cales d'entrefer.

On montre dans ce cas, contrairement au papier [6], que le fait de réduire le module de Young des cales d'entrefer peut avoir un effet bénéfique. Ces cales modifient aussi les fréquences de résonances de la structure et réduisent le

déplacement même à basse fréquence et ceci en lien avec l'effet du module de Young et le coefficient d'amortissement.

Ce constat sur la nature des cales d'entrefer donnant une tendance inversée par rapport au papier [6] nous a ensuite demandé une analyse fine des efforts de Maxwell et de magnétostriction.

6. IMPACT DE L'EFFET DE MAGNETOSTRICTION

Dans le but d'observer les tendances (modèle qualitatif) et l'impact de l'effet de magnétostriction sur le déplacement de la structure, une relation simplifiée (1) reprise de l'article [12] est proposée dans le cas d'une déformation purement verticale avec : Δy la déformation verticale en mètre, $\lambda_T(B)$ la courbe de magnétostriction en $\Delta l/l$ laquelle dépend de B , la densité de flux en Tesla, n le nombre d'entrefer, E le module de Young des matériaux exploités au niveau de l'entrefer en Pascal, H_c la hauteur de la colonne en mètre et e l'épaisseur totale de l'entrefer en mètre.

$$\Delta y = \lambda_T(B)H_c - n \frac{B^2}{2\mu_0 E} e \quad (1)$$

Cette relation ne considère que la colonne et suppose que les effets de magnétostriction et l'effet de Maxwell (forces situées au niveau des entrefers) sont en opposition. A partir de cette relation, on peut par exemple en augmentant la hauteur de colonne avoir une contribution de la composante magnétostrictive plus importante (partie 1 de l'équation liée à la courbe $\lambda_T(B)$). On peut aussi pour une longueur de fer donnée augmentée l'effet de Maxwell (second terme) et réduire ainsi le déplacement et par conséquent atténuer les vibrations. Dans l'article [12], une validation numérique était fournie mais par des mesures expérimentales pour valider les tendances.

Toutes les mesures qui suivent ont été effectuées sous 50Hz en sinusoïdale sur la structure 1. On obtient ainsi une force de fréquence 100Hz. La valeur de l'induction dans nos dispositifs est contrôlée par une spire exploratrice. Nous avons comparé le déplacement obtenu sur la colonne verticale : capteurs en haut et en bas de la colonne d'observer le déplacement et l'allongement de la structure. Sur la figure 17, afin de valider les tendances à partir de la relation 1 entre les effets de magnétostriction et les effets de Maxwell, nous avons placé au niveau des entrefers une cale de même nature mais d'épaisseur variable et un essai sans cale. Pour cet essai, nous avons maintenu l'induction constante. Ainsi le terme en lien avec l'effet de Maxwell (terme entouré) va augmenter.

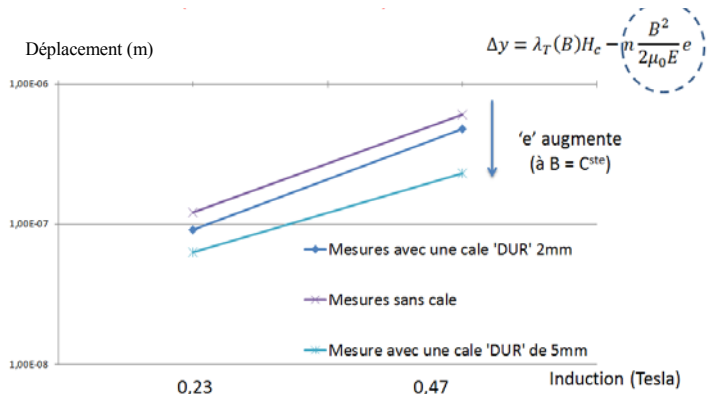


Figure 17 – Déplacement en (m) de la colonne verticale (structure1) avec une augmentation de l'épaisseur des cales.

On peut effectivement observer en bonne concordance avec la relation une diminution du déplacement : la 1^{ère} mesure

«courbe présentant le déplacement le plus important» correspondant à la structure 1 sans entrefer.

Sur la courbe suivante, à partir de la relation du déplacement, nous avons estimé le déplacement de la structure pour différentes hauteurs de colonne (axe horizontal) et pour différentes valeurs du module de Young (axe vertical de gauche). La ligne « blanche » représente un déplacement nul.

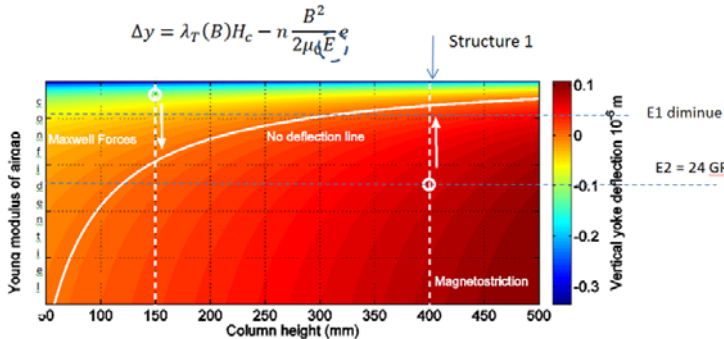


Figure 18 – Valeur du déplacement en (m) de la colonne verticale en lien avec la relation 1 (2 essais placés sur le changement de cales d’entrefer E1 et E2)

Notre structure 1 a une hauteur de colonne de 400mm, ainsi diminuer le module de Young des cales réduit le déplacement car l’effet de magnétostriction est important. Cela est en bonne concordance avec notre essai précédent (figure 17). Ces essais nous a permis de valider les tendances entre l’effet de magnétostriction et l’effet de Maxwell lié aux forces d’entrefer. Celles-ci sont bien en opposition et un bon compromis est à trouver entre les 2 effets. Le résultat obtenu est bien entendu à considérer pour une source sinusoïdale.

Enfin en comparaison avec l’article [6], les 2 selfs (structure 1 et self proposée dans l’article) ont un entrefer identique de 6 mm par colonne, mais leur forme (hauteur) est différente. La hauteur proposée par l’article [6] est de 150mm (ligne pointillée positionnée sur la figure 18). Dans ce cas, l’effet de magnétostriction est beaucoup plus faible que les forces de Maxwell (en faisant l’hypothèse que la courbe de matériau est identique à celle exploitée par notre composant). Par conséquent, pour réduire la déformation de la colonne de ces 2 structures, l’effet des cales dans les entrefers ont une tendance inversée. Avec l’ensemble de ces résultats, nous montrons qu’un compromis est à trouver entre la hauteur du composant et le module de Young afin de tendre vers la ligne de déformation nulle : compensation de l’effet de magnétostriction par l’effet de Maxwell.

7. CONCLUSIONS

Dans cette étude, il a été montré que les selfs sont des composants magnétiques bruyants et ce bruit émis par ces structures est intrinsèque à leur fonctionnement, car il est lié totalement aux forces dues à l’excitation électrique. Pour cela, le composant magnétique et les façons de l’exciter ont été présentés et détaillés. De nombreux tests et la mise en place de nombreuses vérifications sur différentes structures ont permis de présenter l’impact des cales choisies, l’impact de la répartition de l’entrefer ainsi que l’effet de magnétostriction par rapport aux effets de Maxwell.

Pour rappel, nos dispositifs présentent des fréquences de résonances inférieures à 1kHz, ce qui est relativement faible en comparaison avec les composants ferroviaires. Néanmoins si

l’on est capable d’atténuer les déplacements et vibrations en mode forcé, le niveau de bruit sera atténué indépendamment des fréquences de résonances.

En ce qui concerne les différentes cales testées, elles ont une forte influence sur les vibrations et sur le bruit. Les fréquences de résonance évoluent fortement (plus de 40%) en fonction de la matière utilisée. Nous avons aussi montré l’impact entre la hauteur du composant et le module de Young du matériau utilisé pour les cales afin de tendre vers une ligne de déformation nulle : compensation de l’effet de magnétostriction par l’effet de Maxwell. Ainsi pour réduire les nuisances sonores des selfs sans un grand changement de coût de fabrication, d’encombrement et poids, nous avons pu montrer qu’il existe un bon compromis sur la forme de la structure, et plus particulièrement la hauteur de colonne, et sur le type des matériaux utilisé pour les cales d’entrefer.

En perspectives sur les aspects « magnétostriction », il nous faudra renforcer cette étude avec une alimentation MLI.

Remerciements: Ce travail a été financé par l’ADEME ‘projet dBet’ sur les bruits des composants passifs en lien avec Alstom-Transport et la société TRBV-Transrail.

8. REFERENCES

- [1] S. Schmitt, S. Beyer and D. Kampen, “Reducing Noise of Sheeted Electrical Steel Inductors in PWM Operation”, PCIM International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality, Nuremberg, May 2009.
- [2] M. Rossi, « Conception optimale et multi-physique de composants passifs de puissance exploités dans le domaine ferroviaire », Thèse Ecole Centrale de Lille, L2EP, 2012.
- [3] P. Hamberger, “Low Noise Power Transformers – More Energy in large cities with less noise”, UK Magnetics Society, One day seminar, Cardiff, 2009
- [4] B. Weiser, H. Pfützner, Anger J., “Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise of Transformers Cores”, IEEE Transactions on Magnetics, 36(5):3759-3777, 2000.
- [5] Cécile Doche, Eric Augis et Sandrine Bouvet, “Campagne d’essais sur un convertisseur auxiliaire (PROJET PROSODIE) ”, Rapport VIBRATEC réf. 374.055.RA.01.A pour le compte de L’ADEME 2006.
- [6] Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu and all, and Tetsumi Takahata, “Design of a Reactor Driven by Inverter Power Supply to Reduce the Noise Considering Electromagnetism and Magnetostriction”, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume:47, Issue: 10, pp 2772 – 2775, oct. 2011
- [7] Tetsuhiro Ishikawa, Hiroo Sugiyama, Emiko Baba, & all, “Reactor Vibration Analysis in Consideration of Coupling between the Magnetic Field and Vibration”, Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, Volume 2, 872 – 877, oct. 2004.
- [8] M. Rossi, B. Iamamura, M. Hecquet, V. Lanfranchi, S. Recorbet, F. Tridon, “Vibration and acoustic noise of industrial inductors associated to converters in railway domain: design and material impacts”, Congrès ISEF 2015, International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Valencia, Spain, September 10-12, 2015, 09/2015
- [9] J. Anger, A. Daneryd, “Noise in Power Transformers – Models Generation, Transmission and Propagation”, UK Magnetics Society, One day seminar, Cardiff, 2009.
- [10] R. Penin, JP. Lecointe, G. Parent, JF Brudny, “Grain-Oriented Steel Rings for an Experimental Comparison of Relative Magnetostriction and Maxwell's Forces Effects”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol 61, Issue: 8, pp 4374 – 4382, August 2014.
- [11] Jang, Pyungwoo, Choi, Gwangbo, “Acoustic Noise Characteristics and Magnetostriction of Fe-Si Powder Cores”, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 48, Issue:4, pp 1549 – 1552, April 2012.
- [12] M. Rossi, J. Lebesnerais, “Vibration Reduction of Inductors under Magnetostrictive and Maxwell Forces Excitation”, Magnetics, IEEE Transactions on, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 12, pp. 1-6, Dec. 2015.