

CFA/VISHNO 2016

Phénomènes de bruit et vibrations d'origine électromagnétique dans les transports - Cas d'une machine de traction ferroviaire

Q. Souron et J. Le Besnerais

EOMYS ENGINEERING, 121, rue de Chanzy, 59260 Lille-Hellemmes, France
quentin.souron@eomys.com



LE MANS

Cet article étudie l'effet des efforts magnétiques sur le bruit audible et les vibrations de machines électriques couramment utilisées dans le domaine des transports. En effet, l'aspect acoustique est un élément de plus en plus pris en compte par les industriels aussi bien dans le secteur automobile (ex : alternateurs, démarreurs, compresseurs et pompes électriques), ferroviaire (ex : moteurs de traction, composants passifs) et naval (ex : moteurs de propulsion). Deux types de forces responsables du bruit magnétique sont à distinguer : la magnétostriction et les forces de Maxwell. Dans les machines électriques à flux radial, les modes structuraux sont les plus aptes à rayonner du bruit sont ceux impliquant des ondes de vibration radiales de la carcasse (modes circonferentiels). Les efforts magnétostrictifs comme les efforts de Maxwell génèrent des déplacements radiaux de la carcasse, source de bruit. Les calculs numériques et les fichiers audio présentés dans cet article sont effectués à l'aide du logiciel MANATEE®. Ce logiciel est dédié à la conception électromagnétique rapide de machines électriques, incluant le calcul du bruit et des vibrations induites par les efforts électromagnétiques ainsi que le niveau de puissance acoustique à vitesse variable. Les calculs illustrent plusieurs phénomènes physiques à l'origine du bruit électrique (denture, bobinage, saturation, excentricités, alimentation MLI).

1 Introduction

1.1 Bruits d'origine électromagnétique dans les transports

Le bruit audible d'origine électromagnétique, à ne pas confondre avec le bruit électromagnétique du domaine de la CEM (Compatibilité ElectroMagnétique), peut être défini comme le rayonnement acoustique provenant de la présence de champs électromagnétiques (champ électrique ou champ magnétique). Ces champs électromagnétiques sont soit à l'origine d'efforts dits électromagnétiques, qui eux-mêmes peuvent provoquer des vibrations dans le domaine audible, soit directement à l'origine de déformations.

Les moyens de transports électriques comprennent naturellement de nombreux systèmes électriques sources de champs électromagnétiques, plus particulièrement au niveau des éléments assurant le stockage, la dissipation et la conversion de l'énergie électrique (électrique \Leftrightarrow mécanique, électrique \Leftrightarrow thermique, électrique \Leftrightarrow électrique).

On distingue généralement les systèmes dits passifs (conversion en thermique ou électrique), des systèmes dits actifs, qui réalisent une conversion électromécanique. Les vibrations des composants passifs sont liées aux harmoniques de courant et de tension, tandis que les vibrations des composants actifs sont également liées à la fréquence du mouvement mécanique (ex : fréquence de rotation de l'arbre moteur pour la traction électrique).

Les systèmes passifs incluent les convertisseurs statiques, les éléments de filtrage et de transport du courant électrique :

- redresseurs, onduleurs, hacheurs
- capacités, inductances
- transformateurs
- rhéostats de freinage
- résistances de chauffage
- freins à courant de Foucault
- câbles électriques

Les systèmes actifs comprennent l'ensemble des actionneurs électriques, en particulier les moteurs de traction.

Tous ces systèmes peuvent vibrer sous l'effet d'efforts électromagnétiques, et donc émettre du bruit. Suivant le composant considéré et les matériaux en jeu, les efforts suivants peuvent intervenir :

- forces de Maxwell électrostatiques (ex : entre les armatures d'un condensateur)
- forces magnétostrictives (ex : dans le noyau magnétique d'une inductance)

- forces électrostrictives (ex : dans un élastomère diélectrique)
- forces de Laplace (ex : câble noyé dans un champ électromagnétique externe)
- forces de Maxwell magnétostatiques, ou forces réluctantes (ex : stator d'un moteur de traction)
- déformations piézoélectriques

L'identification de la source de bruit électrique est parfois difficile, plusieurs composants de la chaîne électrique ne pouvant fonctionner indépendamment (ex : onduleur et moteur de traction). D'autre part, l'origine électromagnétique du bruit ne peut pas toujours être confirmée par une simple coupure d'alimentation, certains systèmes étant le siège de champs magnétiques permanents, comme par exemple les moteurs de traction à aimants.

Une analyse détaillée des harmoniques en bande fine associée à des connaissances électrotechniques permettent le plus souvent d'identifier l'origine du bruit. Suivant le phénomène, les vibrations sont des fonctions linéaire ou quadratique du courant ou de la tension.

1.2 Bruit électromagnétique des moteurs de traction

Parmi les systèmes électrotechniques impliqués dans les transports électriques, cet article traite plus particulièrement des moteurs de traction électrique de type asynchrone à cage écureuil (Figure 1), utilisés majoritairement dans la traction ferroviaire pour leur faible coût et leur robustesse. On s'intéresse alors aux efforts magnétiques à l'origine du bruit électromagnétique. Dans ce cadre, le bruit acoustique d'origine électromagnétique est parfois nommé « bruit électrique » pour le distinguer des problématiques CEM, mais cette appellation induit une restriction aux champs électriques qui est incorrecte. L'appellation « bruit magnétique » occulte quant à elle le couplage électromagnétique existant entre le circuit électrique de la machine et son champ magnétique à l'origine du bruit.

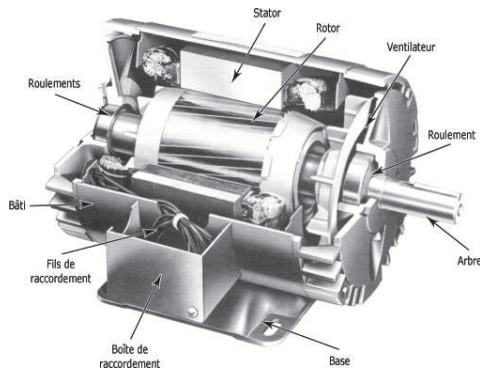


Figure 1: Vue d'une machine asynchrone

Ces machines de traction sont généralement accouplées à un réducteur. Les voies de transfert des bruits et vibrations d'origine aérodynamique (ex : ventilateur), mécanique (ex : roulements) et électromagnétiques (ex : stator) sont illustrées en Figure 2.

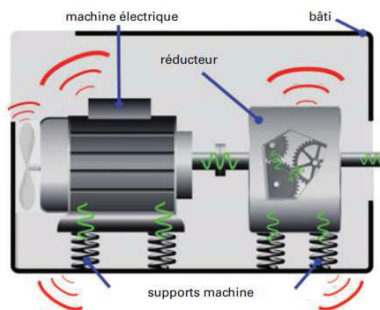


Figure 2: Voies de transferts vibratoires (vert) et acoustiques (rouge) dans une machine électrique [1]

A « haute vitesse », le bruit des machines autoventilées (ventilateur montée sur l'arbre à l'intérieur de la machine) ouvertes domine généralement. Ce n'est pas le cas des machines autoventilées fermées, des machines où la ventilation est indépendante de la vitesse de rotation (échangeur externe), ou des machines refroidies à eau. Le bruit d'origine mécanique, notamment le multiplicateur, peut être présent à haute vitesse. Le bruit d'origine électromagnétique domine donc généralement le bruit soit à très basse vitesse (effet de l'alimentation à Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI [2]), soit à moyenne vitesse [3][4] (effet dit « de denture » [5]).

Deux types d'effort électromagnétique interviennent dans les machines électriques : les efforts magnétostrictifs, dans les tôles magnétiques du stator et du rotor, et les efforts de Maxwell, dont la résultante se concentre à l'interface entre l'entrefer, zone d'air située entre le rotor et le stator, et les tôles magnétiques (Figure 3).

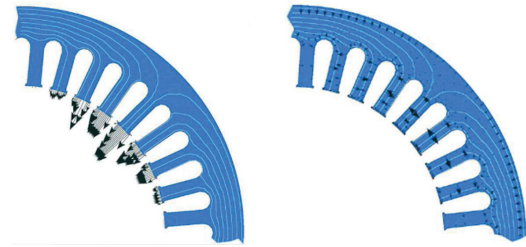


Figure 3: Efforts électromagnétiques s'exerçant sur le stator d'une machine asynchrone (à gauche : Maxwell, à droite : magnétostriction) [6]

Le rôle vibroacoustique des efforts magnétostrictifs est toujours un sujet de débat dans la communauté scientifique, mais selon l'expérience des auteurs ils n'expliquent pas la majorité des problèmes de bruits et de vibrations d'origine électromagnétique. Les deux sources d'efforts sont des fonctions quadratiques du flux et du courant, ce qui explique la difficulté de les dissocier. Dans ce papier, seuls les efforts dits de Maxwell seront donc considérés.

Comme illustré en Figure 3, ces efforts sont principalement radiaux, et tendent à amener le stator vers le rotor (et réciproquement). L'amplitude du premier harmonique de force représente une pression de l'ordre de 10 tonnes par mètre carré. Ces efforts entraînent donc des déformations radiales importantes de la culasse, et peuvent entrer en résonance avec certains de ses modes. Les modes dits de cylindre de la culasse du stator sont les plus importants (Figure 4).

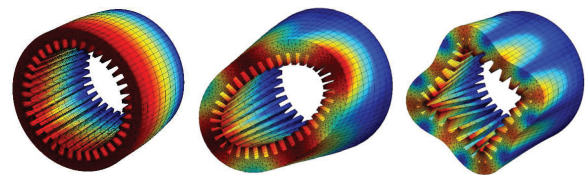


Figure 4: Exemples de modes de lamination d'ordre (0,0), (2,0) et (4,0) obtenus avec MANATEE [7] (condition fixe / libre)

Ces résonances sont particulièrement nombreuses dans les applications des transports électriques où la vitesse varie, l'alimentation générant des courants de fréquence variable. Les efforts magnétiques balaient ainsi une large gamme de fréquence de la phase de démarrage jusqu'au point de fonctionnement nominal, augmentant le risque de coïncidence avec des fréquences naturelles de la machine.

2 Simulation du bruit d'origine électromagnétique

2.1 Introduction

L'isolation vibroacoustique d'une machine tournante bruyante peut être coûteuse, tout particulièrement sur les systèmes de grande série comme des voitures électriques ou les trains. De la même manière, la reconception d'un moteur bruyant sous l'effet des efforts électromagnétiques représente un coût important au niveau d'un projet, car il implique une nouvelle boucle de dimensionnement à la fois

aux niveaux électromagnétique et vibro-acoustique, les deux phénomènes étant couplés.

Il est donc important d'être capable de prédire le bruit électromagnétique rayonné d'une machine de traction électrique au stade de conception en vue d'éviter toute résonance, et savoir diagnostiquer les problèmes apparaissant sur des machines existants. Pour remplir ce rôle, les méthodes éléments finis ont un inconvénient majeur : le temps de calcul cumulé entre modèles électromagnétiques, vibratoires et acoustiques est prohibitif, ne permettant ni études de sensibilité, ni expérimentation numérique. D'autre part, le couplage entre les physiques (électromagnétique->mécanique, mécanique->acoustique) est fastidieux et ne permet pas d'inclure les hautes fréquences (~10 kHz) parfois présentes dans les courants d'alimentation. Des méthodes hybrides doivent donc être développées.

2.2 Logiciel MANATEE®

Le logiciel MANATEE [7] (Magnetic Acoustic Noise Analysis Tool for Electrical Engineer) est un logiciel de simulation intégrée électromagnétique et vibro-acoustique des machines électriques permettant de calculer les vibrations et bruits d'origine électromagnétique à vitesse variable. Il a la particularité d'être particulièrement rapide (quelques secondes de simulations pour un calcul en régime variable jusque 20 kHz) et ne requiert aucun travail de couplage entre les physiques.

Le processus de calcul de MANATEE est présenté en Figure 5. Un modèle électrique calcule dans un premier temps les courants électriques, un modèle électromagnétique en déduit la distribution du champ magnétique en 3D, puis le modèle structural calcule la résultante de ces efforts sur la structure et les déformations de la culasse, enfin le modèle acoustique en déduit la pression et la puissance acoustique rayonnée.

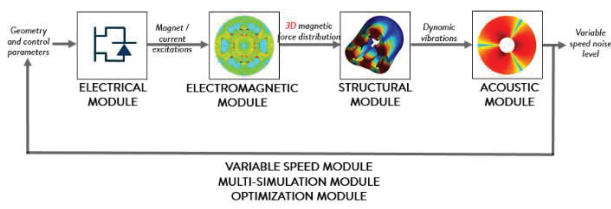


Figure 5: Chaîne de simulation du logiciel MANATEE

3 Etude vibroacoustique d'un moteur de traction ferroviaire

3.1 Objectifs

Dans cette partie, le phénomène de bruit d'origine électromagnétique d'une machine de traction asynchrone de 200 kW est étudié en détail à l'aide du logiciel MANATEE, en mettant en évidence l'effet de différentes sources harmoniques : la denture, le bobinage, la saturation, les excentricités, et l'alimentation MLI. La machine comporte $Z_s=36$ encoches au stator, $Z_r=28$ encoches au rotor et $p=3$ paires de pôles.

3.2 Régime sinusoïdal

Une simulation est initialement effectuée à la vitesse fixe de $N=1200$ RPM. Les efforts magnétiques sont calculés en projetant le tenseur des contraintes de Maxwell sur le stator. La Figure 6 présente un exemple des efforts magnétiques qui agissent sur les dents à 560 et 680 Hz, on y distingue une onde d'effort d'ordre 8 et d'ordre 2.

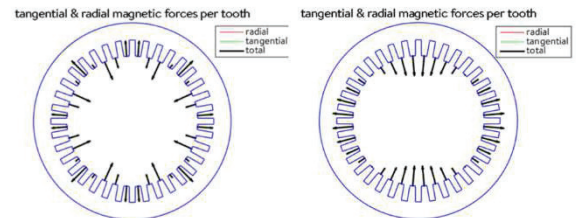


Figure 6: Visualisation des efforts magnétiques en bout de dents (à gauche : 560 Hz, à droite : 680 Hz)

Les forces agissant sur les dents sont principalement radiales. Dans le but d'analyser le comportement acoustique de la machine, MANATEE calcule le spectre de niveau de puissance sonore à vitesse variable ainsi qu'un sonagramme (voir Figure 7, calcul effectué en une seconde sur un PC). Ce dernier est une visualisation en deux dimensions de trois paramètres :

- Axe x : la fréquence du niveau de pression sonore
- Axe y : le temps ou la vitesse de rotation
- Axe z : l'amplitude du niveau de pression sonore

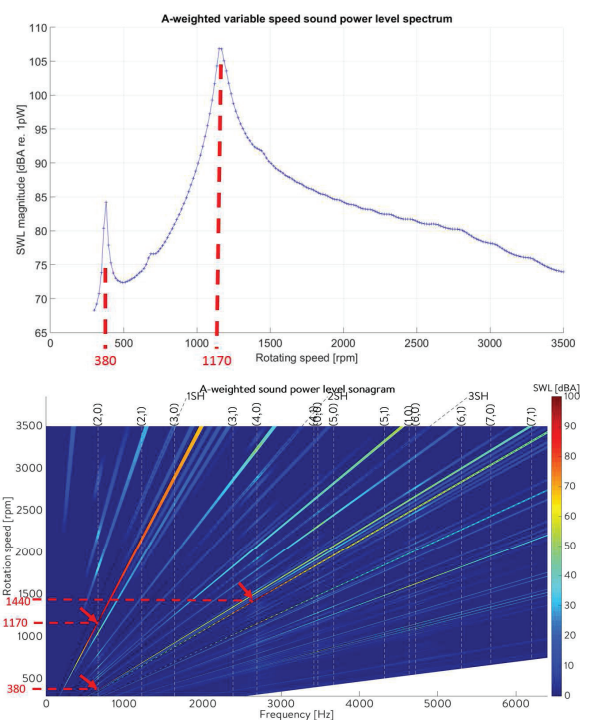


Figure 7 : Sonagramme de la machine étudiée en régime sinusoïdal

Sur le sonagramme, les lignes verticales en pointillés correspondent aux fréquences naturelles calculées par MANATEE.

La Figure 7 montre deux résonances acoustiques à 380 et 1170 RPM. Elles correspondent à deux raies d'encoche de nombre d'onde 2 excitant le mode d'ovalisation (2,0) du stator. Une troisième résonance apparaît à 1440 RPM : elle correspond à une excitation du mode elliptique d'ordre 4. Cette contribution du nombre d'onde d'ordre 4 peut également être vérifié à l'aide du graphique de différentes contributions modales du niveau de puissance sonore (Figure 8).

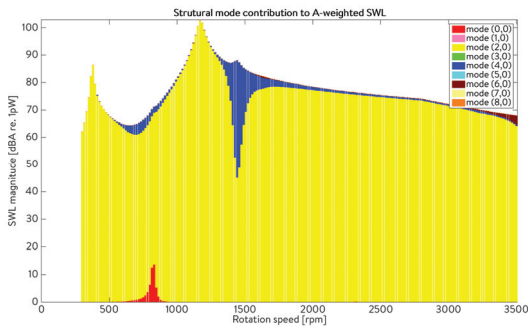


Figure 8: Contribution modale au niveau de puissance sonore

3.3 Harmoniques de denture

Sur cette machine, l'excitation à l'origine de la résonance principale est due à une excitation magnétique dite de « denture ». L'expression de la fréquence spatiale (nombre d'onde) de l'harmonique d'effort est en effet donné par $Z_s - Z_r - 2p = 36 - 28 - 6 = 2$, il est donc fonction des nombres de dents au stator et au rotor. Ce nombre d'onde coïncidence avec le mode d'ovalisation de la lamination, ce qui est une condition pour qu'il y ait la résonance.

Le logiciel MANATEE permet de procéder à des études de sensibilité dans le but d'analyser les paramètres influençant le niveau de bruit dans un processus de reconception de machine. Une étude de sensibilité est effectuée pour concevoir une machine avec un nombre de dents au rotor (Z_r) minimisant le niveau de puissance sonore maximal $L_{WA,max}$ en régime variable. Le résultat de l'optimisation est montré à la Figure 9.

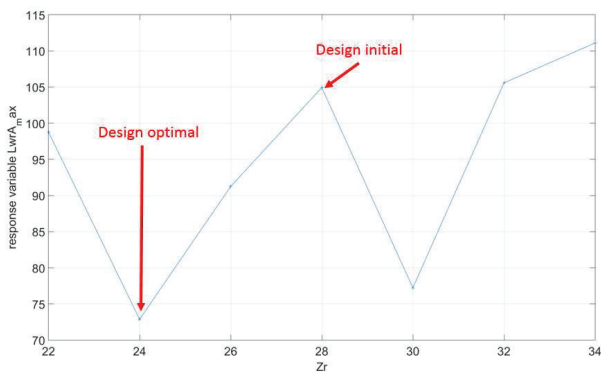


Figure 9 : Bruit magnétique à la résonance en fonction du nombre d'encoches

Cette figure montre que l'on minimise la valeur $L_{WA,max}$ pour lorsque la variable géométrique $Z_r=24$. Cela démontre que le niveau de bruit maximal observé est fortement lié à la

denture. Notons que l'effet du changement du nombre de dents sur les performances électromagnétiques du moteur (ex : couplement, rendement) est également inclus dans cette simulation.

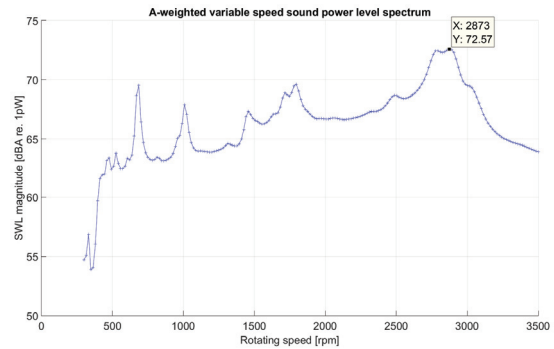


Figure 10: Spectre du niveau de puissance sonore avec $Z_r=24$

Le nombre de dents a une influence significative sur le niveau de bruit et il est possible de réduire significativement le niveau sonore d'une machine en modifiant sa topologie.

3.4 Harmoniques de bobinage

La Figure 11 présente la disposition du bobinage triphasé pour la machine étudiée.

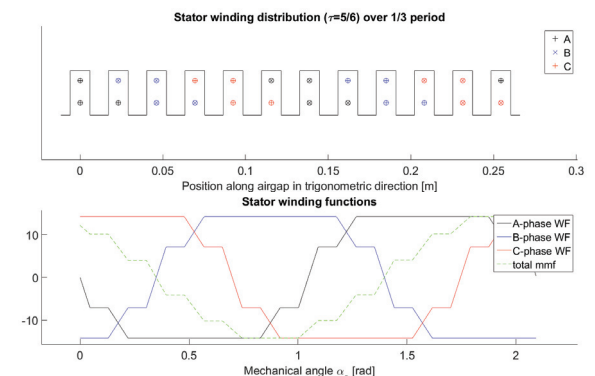


Figure 11 : Motif du bobinage - machine initiale

Dans le but d'analyser l'effet que peut avoir la distribution du bobinage sur le bruit, un motif différent de bobinage (sans pas raccourci) est simulé (Figure 12).

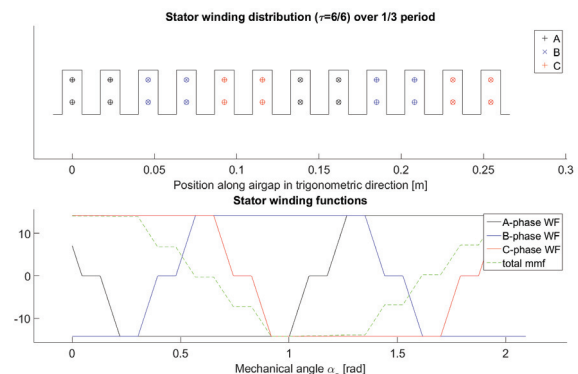


Figure 12 : Nouvelle distribution de bobinage

Le nouveau spectre de niveau de puissance sonore est tracé en Figure 13. Il fait apparaître une nouvelle résonance à 702 RPM.

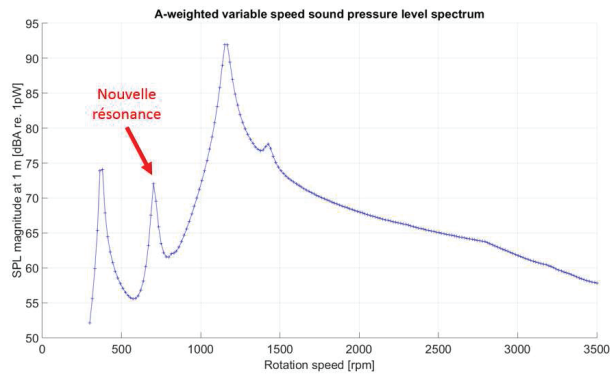


Figure 13 : Effet du pas de bobinage

Cette résonance est causée par l'ajout d'une excitation qui entre en résonance avec le mode d'ovalisation (2,0) préalablement identifié. Ainsi, le motif de distribution du bobinage a un effet sur le niveau de puissance sonore de la machine.

3.5 Harmoniques de saturation

Pour étudier l'effet de la saturation magnétique (non linéarité de la courbe B(H)) sur le comportement acoustique de la machine considérée, la valeur de la tension est doublée ($U_0 = \frac{600}{\sqrt{3}}V$). Le sonogramme avec saturation est présenté en Figure 14.

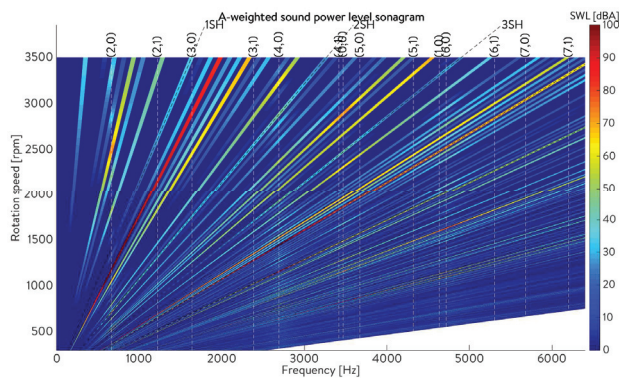


Figure 14 : Sonogramme de la machine étudiée avec saturation

Une nouvelle raie acoustique apparaît près de l'harmonique d'encoche de nombre d'onde 2. Cette raie, liée à la saturation, a un nombre d'onde $Z_r - Z_s + 4p = 4$ et une fréquence à vide $f = f_s \left(\frac{Z_r}{p} \right) + 4$. Pour cette machine, l'effet de la saturation ne crée pas de résonance supplémentaire. Cependant, il est possible que pour une autre topologie de machine à cage d'écureuil, cet harmonique de saturation génère un important niveau sonore.

3.6 Harmoniques d'excentricités

En théorie, l'association d'un stator et d'un rotor est parfaitement concentrique. Cependant, lors du processus de montage du rotor puis en fonctionnement, des excentricités peuvent apparaître. La Figure 15 montre les différents types d'excentricités pouvant exister dans un système stator-rotor.

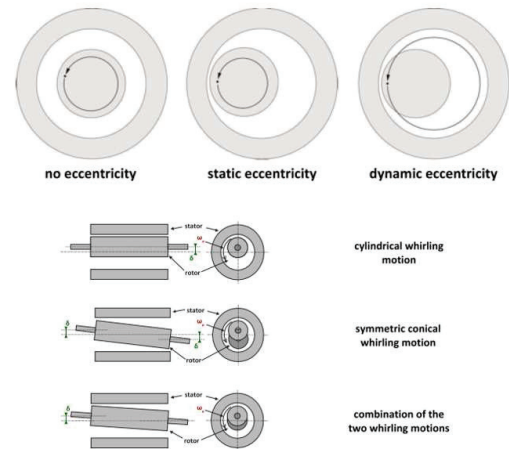


Figure 15: Excentricités statiques et dynamiques et différents types d'excentricités dynamiques ([8],[9])

Ce type de défaut peut être simulé à l'aide du logiciel MANATEE. Une excentricité statique de 10% (relativement à la largeur de l'entrefer) est introduite et un spectre de niveau de puissance sonore à vitesse variable est calculé en Figure 16.

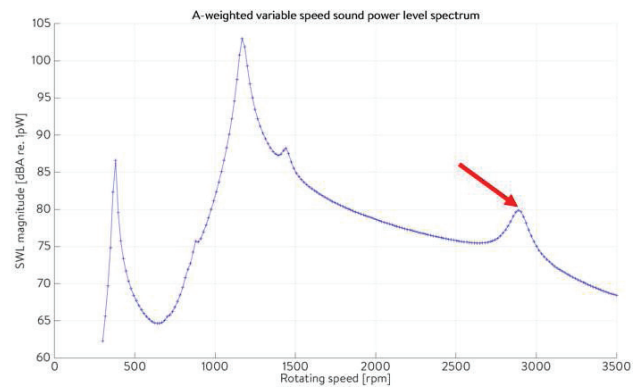


Figure 16: Spectre de niveau de puissance sonore pour une excentricité de 10%

Ce spectre fait apparaître une troisième résonance à 2900 RPM. Afin d'analyser la cause de cette nouvelle résonance, le sonogramme est tracé (Figure 17).

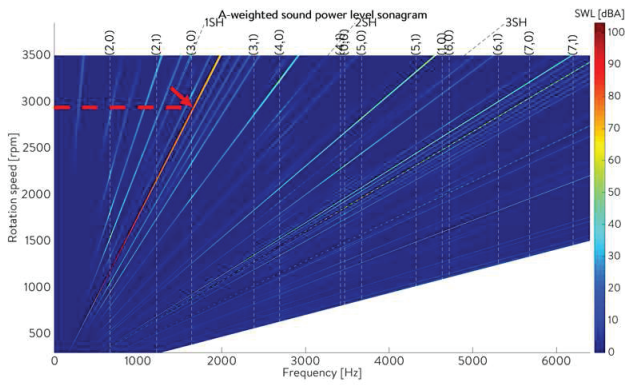


Figure 17: Sonagramme pour une excentricité statique de 10%

L'excentricité statique module les excitations de denture par +/-1. Ainsi, l'excitation de nombre d'onde $r=2$ qui était responsable de la principale résonance (voir §3.2) est à présent dédoublée en une excitation de nombre d'onde 1 et une excitation de nombre d'onde 3. Cette dernière excite le mode (3,0) responsable de l'apparition d'une nouvelle résonance.

Une excentricité dynamique de 15% est à présent simulée, le sonagramme et le niveau de bruit résultant en régime variable sont présentés en Figure 18.

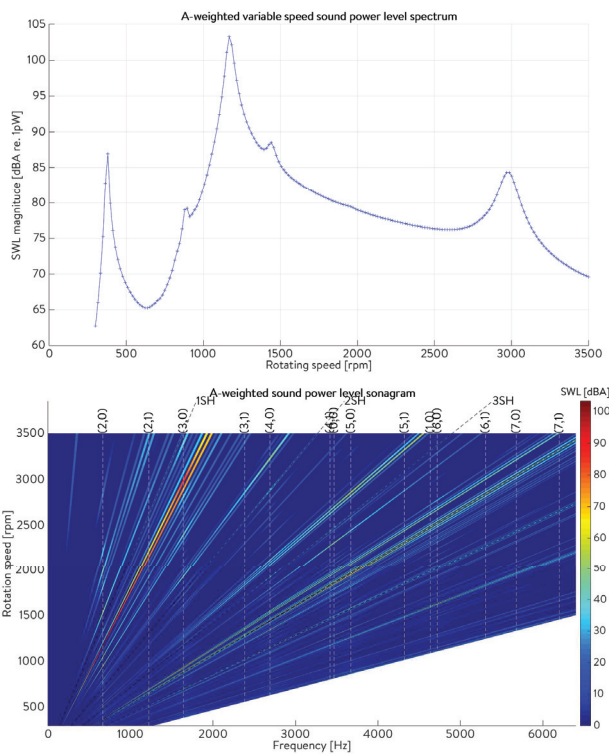


Figure 18: Spectre de niveau de puissance et sonagramme pour une excentricité dynamique de 15%

A l'instar du cas d'excentricité statique, un mode circconférentiel impair est excité (mode (3,0)). Cependant, le sonagramme n'est pas parfaitement identique à celui du cas d'excentricité statique : le mode est excité sur une plus large bande de fréquence. Ceci est dû au fait que l'excentricité dynamique module les excitations à la fois en espace (comme l'excentricité statique) mais aussi en temps. Cette

modulation temporelle introduit des bandes latérales aux multiples de la fréquence mécanique.

3.7 Harmoniques de lamination

La non-circularité des laminations de stator ou de rotor peut être due à des effets de segmentation, de soudure, de tolérances de conception, ou des déformations dues au poids ou de dilatation thermique. Cette non-circularité des laminations module les forces magnétiques et a donc un effet significatif sur les niveaux sonores [11]. Pour analyser cet effet, une lamination déformant l'entrefer de 10% à cause de six points de soudure est simulée dans MANATEE (Figure 19).

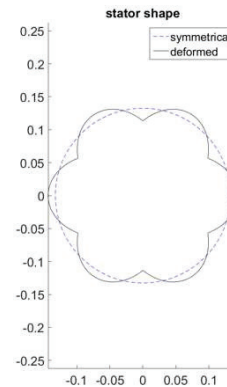


Figure 19 : Simulation d'un stator non circulaire

La Figure 20 montre que le sonagramme de la nouvelle géométrie est bien plus riche que la géométrie parfaitement circulaire.

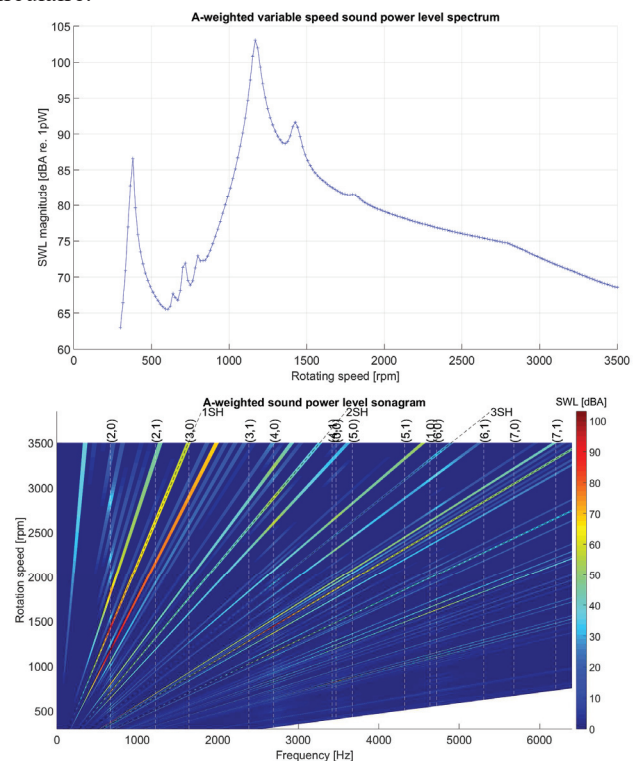


Figure 20 : Spectre de niveau de puissance et sonagramme d'une lamination déformée avec 6 soudures régulièrement espacées

3.8 Harmoniques MLI

La présence de l'alimentation (MLI) module l'ensemble des efforts magnétiques dans le temps par l'intermédiaire des courants. Pour une MLI asynchrone, cela se traduit par des raies en forme de « V » sur les sonagrammes ; ces raies sont reconnaissables au fait qu'elles ne passent pas par l'origine contrairement aux autres raies d'excitation proportionnelles à la fréquence fondamentale (encoche, saturation).

Ces raies peuvent exciter un mode de structure d'ordre 0 ou $2p$ ($2p=6$ dans notre cas), et leur excitation forcée augmente significativement le niveau sonore de la machine.

4 Conclusion

Le bruit des systèmes de transports (automobile, ferroviaire, naval) peut être dominé par un bruit dit électromagnétique, généré par la présence de champs électriques ou magnétiques. C'est le cas des machines électriques de traction, dont le niveau de bruit et vibration d'origine magnétique dépend de paramètres de conception électrotechnique et de commande (ex : nombre d'encoches, niveau de saturation, stratégie d'alimentation).

Des outils de simulations rapides permettent aujourd'hui de prévoir l'effet de ces paramètres sur le niveau de bruit dès le stade de conception, et de diagnostiquer les problèmes de bruit et vibrations sur les machines existantes.

Références

- [1] J. Le Besnerais, P. Pellerey, V. Lanfranchi et autres, 10 nov. 2013, "Bruit acoustique d'origine magnétique dans les machines synchrones" dans "Machines électriques tournantes : conception, construction et commande", [en ligne], Editions T.I. [Paris, France], 2016, d3581
- [2] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet and P. Brochet, "Characterization and Reduction of Audible Magnetic Noise Due to PWM Supply in Induction Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1288-1295, April 2010.
- [3] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, et M. Hecquet, et autres, 10 mai 2013, "Bruit audible d'origine magnétique dans les machines asynchrones" dans "Machines électriques tournantes : conception, construction et commande", [en ligne], Editions T.I. [Paris, France], 2016, d3580
- [4] J. Le Besnerais, "Reduction of magnetic noise in PWM-supplied induction machines – low-noise design rules and multi-objective optimisation," Ph.D. dissertation, Ecole Centrale de Lille, France, Nov. 2008
- [5] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet and P. Brochet, "Optimal Slot Numbers for Magnetic Noise Reduction in Variable-Speed Induction Motors," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 8, pp. 3131-3136, Aug. 2009.
- [6] M Belahcen, "Magnetoelasticity, magnetic forces and magnetostriction in electrical machines" Ph.D. dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, Aug. 2004.
- [7] MANATEE software, Magnetic Acoustic Noise Analysis Tool for Electrical Engineering. Version 1.05, <http://www.eomys.com>, EOMYS ENGINEERING, 2016
- [8] C. Schlensok, B. Schmülling, M. Van Der Giet, and K. Hameyer, Electromagnetically excited audible noise-evaluation and optimization of electrical machines by numerical simulation. *Journal of Electrical Power Quality and Utilisa- tion* 26, 3 (2006), 727–742
- [9] A. Tenhunen, T. Benedetti, T. Holopainen, and A. Arkkio, Electromagnetic forces in cage induction motors with rotor eccentricity. In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (2003)*, vol. 3, IEEE, pp. 1616–1622.
- [10] J. Le Besnerais, A. Fasquelle, J. Pelle, S. Harmand, M. Hecquet, V. Lanfranchi, P. Brochet, and A. Randria, "Multiphysics modeling: electro-vibro-acoustics and heat transfer of induction machines," in *Proc. of the International Conference on Electrical Machines (ICEM'08)*, Villamura, Portugal, Sep. 2008
- [11] J. Le Besnerais, "Effect of lamination asymmetries on magnetic vibrations and acoustic noise in synchronous machines," *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2015 18th International Conference on, Pattaya, 2015, pp. 1729-1733.