

Impact d'encoches fictives sur les harmoniques de forces radiales et le couple de MSRel assistées d'aimants de faible puissance.

T. Tollance^{1,2}, M. Hecquet¹, M. Tounzi¹, F. Gillon¹.

¹L2EP, Univ. Lille, Centrale Lille, Arts et Metiers ParisTech, HEI, EA 2697, F-59000 Lille.

²SOMFY, R&D Center, F-74307 Cluses Cedex, France.

thierry.tollance@somfy.fr; michel.hecquet@centralelille.fr;

RESUME – L'objectif de ce papier concerne la problématique de dimensionnement de machines de faible puissance (20W environ), synchro-réductantes (MSRel) assistées d'aimants en ferrite. La machine étudiée possède un bobinage dentaire facilitant sa réalisation. Les contraintes concernent le diamètre extérieur limité à 5 cm, le couple à atteindre ainsi que la limitation du bruit émis. L'objectif visé est d'observer l'impact d'encoches fictives (encoches sans conducteurs) ajoutées au rotor sur les harmoniques de forces radiales (lien avec le bruit d'origine magnétique) et le couple (couple moyen et harmoniques de couple). Pour cela, différentes configurations de stator et rotor sont modélisées en 2D par éléments finis afin de comparer les performances électromagnétiques mais aussi le contenu harmonique des grandeurs. Des simulations numériques de l'électromagnétique jusqu'à la vibro-acoustique de ces machines sont aussi présentées et comparées à des mesures expérimentales.

Mots-clefs : machine synchro-réductante, encoches fictives, harmoniques de couple, harmoniques de forces radiales, bruit, vibrations.

1. INTRODUCTION

Dès la phase de conception de moteurs électriques, les aspects vibro-acoustiques ne sont plus à négliger pour de nombreuses applications. Cela permet d'assurer plus de confort et moins de gêne à l'utilisateur demandant aux concepteurs de trouver un bon compromis entre les performances du moteur (couple, rendement) et le bruit d'origine magnétique.

Les machines MSRel avec bobinage dentaire sont connues pour avoir de très grandes ondulations de couple. De nombreux articles donnent des solutions pour réduire cette ondulation de couple en fonction du nombre de barrières de flux et de leur forme [1] [2]. Le niveau de ces oscillations de couple peut aussi engendrer des problèmes vibratoires [3] et leurs maîtrises ne permettent pas forcément de réduire le bruit d'origine magnétique de la machine [4].

Différents articles sur le bruit magnétique de ces machines fournissent des solutions topologiques essentiellement avec des combinaisons à éviter en fonction des modes propres de la structure [5], [6] soit en augmentant l'amortissement afin de réduire l'amplitude des vibrations sur les fréquences de résonance concernées [7]. D'autres solutions existent pour atténuer le bruit en ajoutant des encoches fictives (exemple sur la figure 3) permettant d'atténuer le niveau de bruit et maintenant les performances électromagnétiques des machines [8-11], ainsi qu'en ajustant l'angle de pilotage de la machine [12]. On peut aussi ajuster les fréquences de résonance de la structure mécanique en changeant la forme de la tôle stator pour

déplacer les fréquences qui seraient concordantes avec les modes propres de la structure [13].

Actuellement, l'étude des phénomènes multi-physiques, de l'électromagnétique au bruit en couplant le calcul des efforts électromagnétiques, l'étude vibratoire et acoustique, peut se faire en utilisant une démarche toute numérique. Cela peut permettre de comparer différentes solutions et/ou valider une structure de machine [14], [15].

L'objectif de cette étude est de comparer différentes solutions pour une application faible puissance à diamètre fortement contraint. Dans ce cas, il est évident que les topologies stator – rotor sont limitées.

Des simulations obtenues par éléments finis (E.F.) peuvent permettre de comparer l'évolution des contenus harmoniques spatio-temporels de l'induction dans l'entrefer à l'origine des pressions radiales mais aussi le contenu des harmoniques de couple pour différentes structures. Une réalisation expérimentale permettra de comparer le gain au niveau acoustique et montrer les avantages et inconvénients de la solution obtenue.

2. MACHINES ETUDIEES (MSREL)

Le stator des différentes structures est fixé à 6 dents avec un bobinage dentaire et le rotor est composé de 4 pôles avec des aimants en ferrite insérés dans la barrière de flux. Cette machine à aimants enterrés possède un effet de saillance important et on parle plutôt de machines synchro-réductantes.

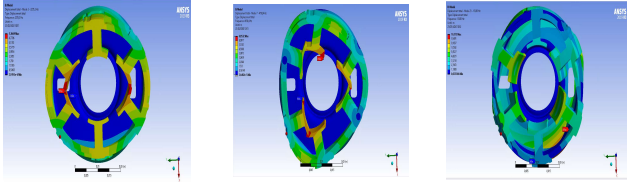
Une machine de référence 6/4 a été étudiée dans [6] avec des performances électromagnétiques satisfaisantes et répondant au cahier des charges :

- $N=3000\text{tr/min}$; $V=230\text{V}$; $f_s=100\text{Hz}$;
- $C_{\text{nom}} \geq 60\text{ mNm}$ ($P=20\text{W}$) et $\phi_{\text{ext}} < 5\text{cm}$,
- Alimentation de la machine sinusoïdale avec un courant sinusoïdale.
- Moteur avec couplage triangle
- Tôle d'épaisseur .65 mm, M800-65A.
- $B_r = 0.43\text{ [T]}$

Par contre, des mesures acoustiques ont montré un niveau important pour l'application concernée autour de 50dB (élevé pour les applications « domestiques » avec des exigences de plus en plus contraintes mais aussi afin de respecter le confort des utilisateurs souhaitant une discrétion de leur produit). En effet, une raie acoustique et vibratoire élevée à 2000Hz ($20f_s$) d'ordre spatial 2 domine le spectre [6]. L'origine de l'excitation

est due à la configuration de la machine et plus particulièrement aux harmoniques de perméances.

Une analyse modale par EF est effectuée avec le moteur complet en intégrant la masse des bobines et le rotor. Celle-ci va nous permettre de voir les modes propres de la structure avec les liaisons mécaniques ajustées par rapport aux montages du moteur.



Mode 2 à 2500 Hz Mode 3 à 5200 Hz Mode 4 à 7700 Hz

Figure 1 : Analyse Modale par EF de la structure.

La figure 2 nous donne la mesure de bruit effectuée sur un moteur de référence [6] sans l'ajout d'encoches fictives, et avec des conditions de liaison mécanique au niveau des paliers du moteur nous donnant une fréquence de résonance du mode 2 à environ 2000 Hz.

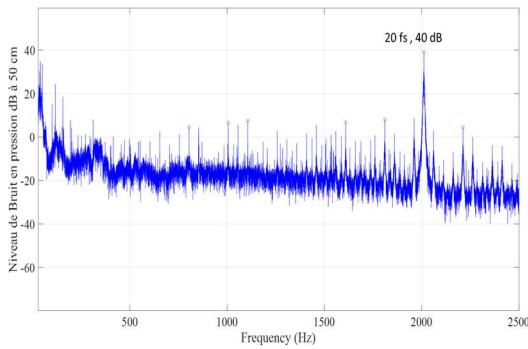


Figure 2 : Mesure du niveau de bruit de la MSRel à aimants de référence sans encoches fictives au rotor.

On remarque qu'il y a une raie (ou des raies) autour de 2000Hz acoustique en lien avec l'effet de résonance du mode 2. Cette raie est très gênante et est la principale contributrice du bruit de ce moteur. Notre travail va consister à la réduire.

Pour cela, nous avons proposé l'ajout d'encoches fictives afin de réduire cette raie. Une étude paramétrique sur la dimension et la position de l'encoche fictive au rotor nous a permis de trouver une machine qui répond au cahier des charges en réduisant le niveau de l'harmonique gênant du moteur. Ci-dessous un exemple de machines avec une encoche fictive ajoutée au rotor (figure3) :

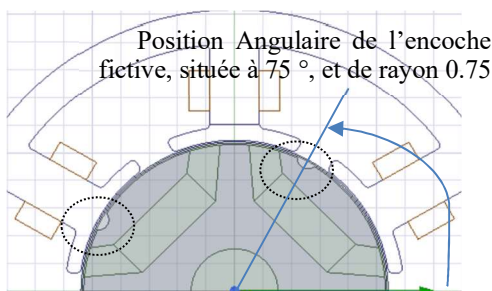


Figure 3 : MSRel à aimants avec 1 encoche fictive par pôle au rotor.

La démarche pour cette étude est la suivante :

- Etat des lieux des efforts électromagnétiques pour la machine initiale, de façon à trouver la provenance des efforts, leurs ordres spatial et fréquentiel, le calcul de l'induction radiale par EF, en lien avec une alimentation sinusoïdale et un courant de 0.2 A efficace par phase.
- Etude paramétrique en faisant varier les paramètres de l'encoche du rotor diamètre et position angulaire de cette encoche, par EF. Dans cette étude paramétrique, nous analysons la valeur du couple moyen pour le courant de 0.2 A et la valeur de la force à 20 fs +/- 6 fs pour le mode 2. Pour calculer les efforts électromagnétiques, l'induction radiale calculée sous EF est traitée via un programme Matlab pour analyser la FFT2D de ces efforts.
- Cette analyse paramétrique nous permet de trouver un optimum par rapport à notre besoin de maintenir un couple suffisant tout en réduisant les harmoniques souhaitées.
- Tous ces calculs magnétiques seront ensuite transmis à un logiciel de mécanique (Ansys Mechanical) pour faire une étude toute numérique sur la vibro acoustique.
- Finalement tout cette démarche sera validée par un prototype pour vérifier la diminution de cette raie à 2000 Hz.

3. MODELES ELECTROMAGNETIQUES ET ESTIMATION DES EFFORTS

Les simulations par éléments finis sont effectuées sous Maxwell 2D avec la prise en compte du mouvement, en considérant la non-linéarité des matériaux magnétiques et en imposant le courant sinusoïdal à sa valeur nominale (ce qui correspond aux essais). Les conditions de simulations sont les suivantes : $N=3000\text{tr/min}$; $V=230\text{V}$; $f_s=100\text{Hz}$; $C_{\text{nom}} \geq 60\text{ mNm}$, $I_{\text{charge}} = 0.2\text{ A}$ efficace,

Le couple électromagnétique moyen a été estimé en fonction de l'angle ψ et le choix de l'angle est considéré au couple maximale ($\psi = 45^\circ$) : point de comparaison pour l'ajout des encoches fictives.

3.1. ANALYSE DES EFFORTS

Les efforts électromagnétiques sont calculés en fonction du temps et de l'espace depuis le calcul de l'induction radiale dans l'entrefer selon l'équation suivante :

$$\sigma_{rad}(t, \theta) = \frac{B_r^2(t, \theta) - B_t^2(t, \theta)}{2\mu_0} [N.m^{-2}] \quad (1)$$

Les fréquences et ordre spatiaux peuvent être définis avec l'aide d'une transformation de fourrier 2D (FFT) :

$$\sigma_{rad}(t, \theta) = \sum_{f,r} P_{fr} e^{j(2\pi f t - r\theta + \varphi_{fr})} \quad (2)$$

Ou (r, f) représentent le nombre d'ondes ou ordre spatial (r), et la fréquence (f), P_{fr} étant l'amplitude de l'harmonique et φ_{fr} la phase.

Nous allons considérer que la composante radiale de l'induction est la seule qui génère des efforts électromagnétiques.

Afin de vérifier l'existence de raies de pression (ordres spatial et fréquentiel), il existe différentes relations permettant de prendre en compte par exemple les effets dus aux harmoniques de denture.

La relation suivante [4] reprend les paramètres : p étant le nombre de paires de pôles, f étant la fréquence, Ns le nombre d'encoches stator, n,m,k=0,1,2....., nombre entier

$$f_{(of,r)} \propto [2npf, -2np \pm 6mp \pm kNs] \tag{3}$$

(Of et r : ordres fréquentiel et spatial)

3.2. ETUDE PARAMETRIQUE

Une étude de paramétrique, EF(Maxwell 2D) en non linéaire, sur la position angulaire de cette encoche fictive et son rayon nous permet de choisir une configuration qui nous donne un couple moyen qui répond au cahier des charges et une diminution de la raie à 20fs. Les résultats de cette étude sont sur les figures 5 et 6 Le niveau de courant est de 0.2 A efficace par phase en charge, ce courant est imposé dans chaque phase.

Ensuite, nous regardons si avec un fonctionnement à vide nous obtenons les mêmes tendances, car la mesure expérimentale ne se fera qu'à vide, il n'existe pas chez Somfy de test pour faire des meures vibro acoustique fiable en charge, nous avons préféré rester à vide pour les essais.

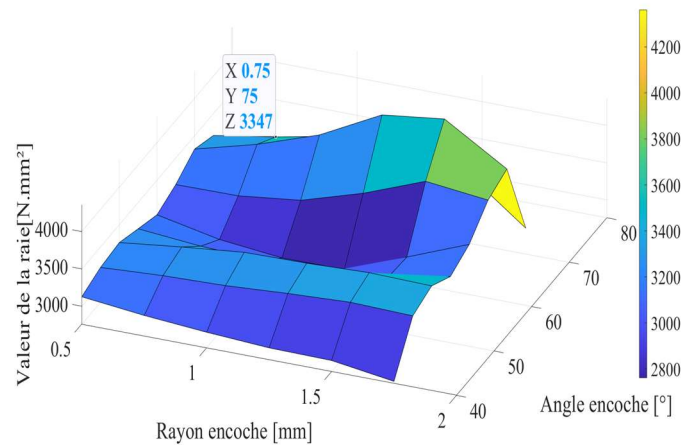


Figure 4: Evolution de la raie de force à 20fs en fonction du rayon et de la position angulaire de l'encoche

La configuration représentée sur la figure 3 donne pour l'encoche fictive : **un rayon de 0.75mm et un angle de 75°** comme solution optimale pour notre application.

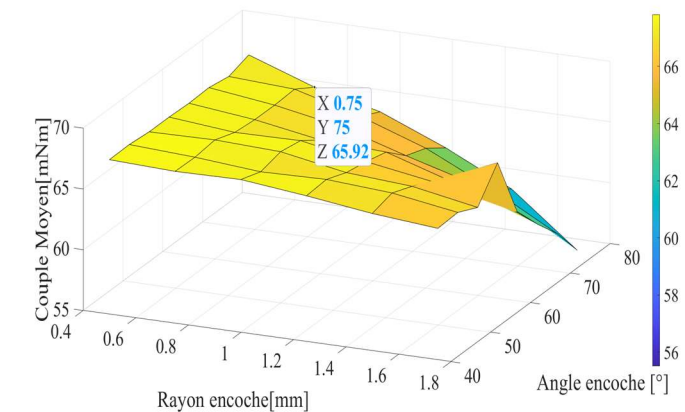


Figure 5: Evolution du couple électromagnétique en fonction du rayon et de la position angulaire de l'encoche

Une fois que nous avons trouvé une configuration qui répond à notre besoin, une deuxième encoche est ajoutée de façon symétrique comme le montre la figure 7. Cet ajout nous permet de valider notre structure dans les 2 sens de rotation, c'est-à-dire obtenir le même niveau de couple et d'efforts électromagnétiques dans les 2 sens.

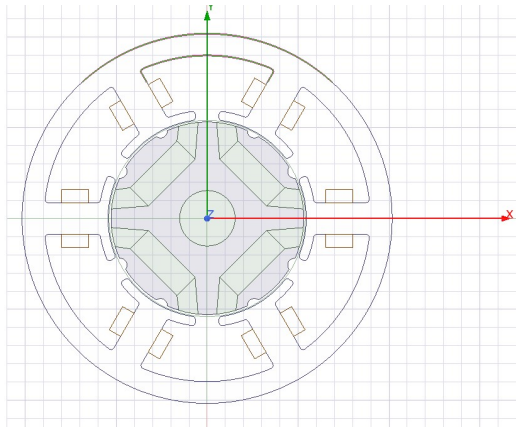


Figure 6 : Machine simulée en EF et Mecanique avec 2 encoches par pôles

L'évolution du couple électromagnétique est donnée figure 7 en comparaison avec la forme du couple de la machine de référence [6].

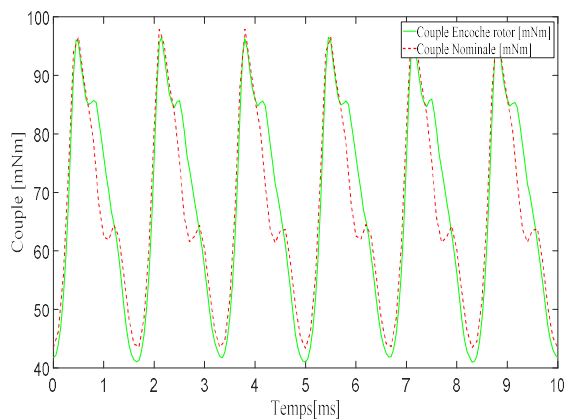


Figure 7 : Couple instantané pour chaque configuration

Le couple moyen passe de 67.5mNm à 65.7mNm.

Les FEM de la configuration sans encoches et celle avec encoche sont présentées sur la figure suivante :

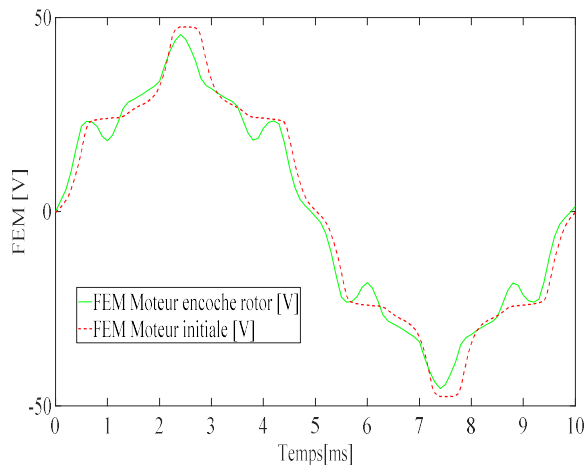


Figure 8: FEM simulée EF, moteur initial et moteur avec encoche rotor

On voit une différence de forme.

Les valeurs efficaces sont présentées dans le tableau 1 avec la valeur de couple moyen obtenu.

Tableau 1 : Valeur Efficace de la FEM et du couple moyen pour les 2 machines simulées

FEM efficace Moteur initial V	FEM Moteur avec 2 encoches rotor V	Ecart %
27.8	26.6	4.5 %
Couple Moyen Moteur initial mNm	Couple Moyen avec 2 encoches rotor mNm	Ecart %
67	65.7	1.9 %

Les inductions radiales spatio-temporel sont présentées sur les figures 9 et 10.

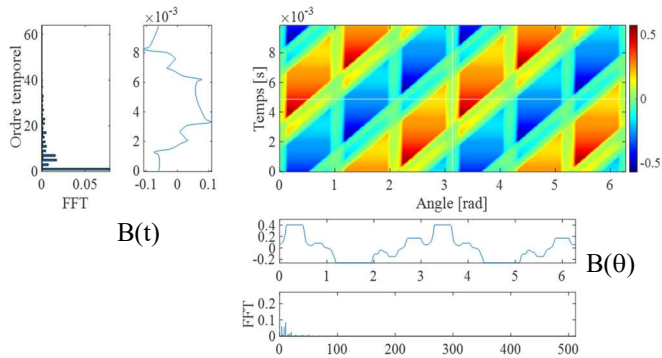


Figure 9 : Induction radiale Machine initiale

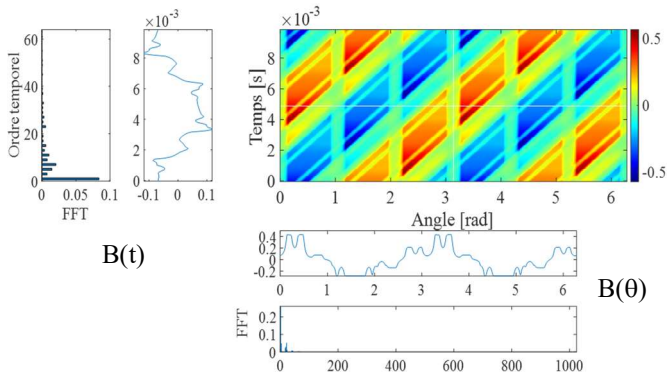


Figure 10 : Induction radiale Machine avec 2 encoches rotor

L'ajout d'encoches fictives par pôle sur le rotor créent 2 « trous » dans les inductions spatiales et temporelles.

A partir des 2 FFT 2D des inductions radiales, le niveau de pression magnétique est calculé, et comparé sur la figure 12, la différence entre les efforts avec et sans encoche au rotor sont présentées, on peut voir que certaines raies sont améliorées (spécifiquement la raie à 20 fs d'ordre 2), certaines raies d'ordre élevées sont fortement augmentées (10 fs, ordre 20).

On peut observer sur la figure 11 différentes variations des harmoniques en conservant un niveau de couple moyen acceptable (-2 %, sur la valeur moyenne du couple) pour notre application. La raie pénalisante est réduite de 66.6%.

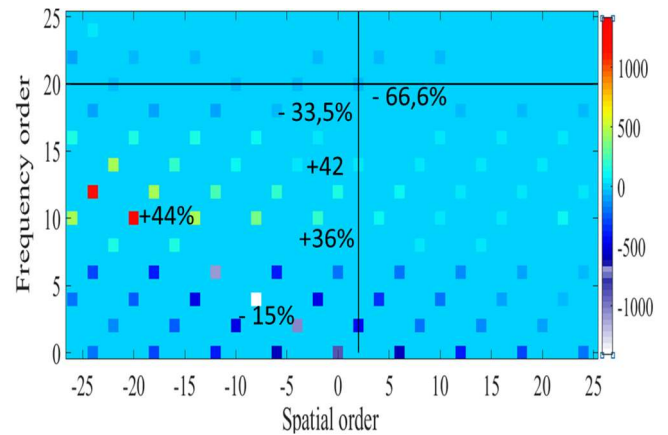


Figure 11 : Comparaison des niveaux de pression des 2 machines
Modèle numérique Vibratoire et Acoustique en charge

4. MODELE NUMERIQUE VIBRATOIRE ET ACCOUSTIQUE

Les 2 configurations de moteur ont été simulé en vibro acoustique avec Ansys Workbench.

Le calcul des efforts sous Maxwell est effectué avec le tenseur de Maxwell. La pression est calculée sur une ligne dans l'entrefer sous chaque dent ou alors sur la dent du stator, en créant une section spécifique de la dent et ceci sur toutes les dents.

Le flow de simulation est sur la figure 12.

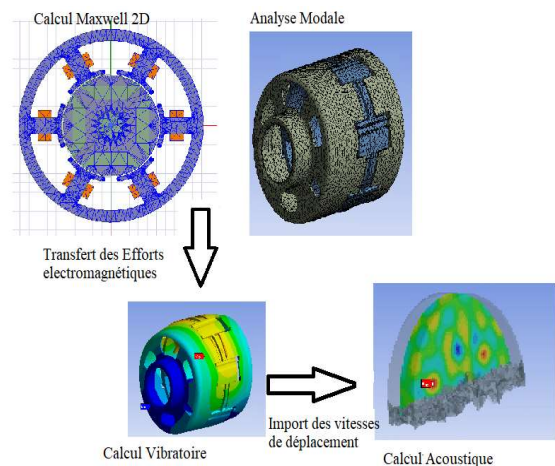


Figure.12 : Workflow pour le calcul du bruit depuis le calcul des efforts

Le passage des efforts électromagnétiques est fait directement par Ansys Workbench, les forces sont injectées par décomposition harmonique des efforts sur chaque dent. Le signal importé dans la résolution mécanique doit avoir un nombre de points suffisamment grand pour avoir une bonne FFT du signal.

Pour notre cas, le pas de temps est de 0.05 ms et un calcul est effectué sur 2 périodes électriques, ce qui donne un nombre de pas de 400. Celle-ci sera reproduite 6 fois, cela étant fait de façon automatique, maxwell va reproduire ce signal sur 6 périodes.

4.1 ANALYSE MODALE DE LA STRUCTURE

Une analyse modale est effectuée avec le moteur complet, des masses supplémentaires sont ajoutées pour les bobines et le rotor. Celle-ci va nous permettre de voir les modes propres de la structure.

4.2 ANALYSE VIBRATOIRE

Après avoir effectué les calculs des efforts sous maxwell en 2D, à vide avec une courant efficace dans chaque phase de 0.035 A, ces efforts sont reportés dans le calcul vibratoire de façon automatique sur les dents du stator.

4.3 ANALYSE ACOUSTIQUE

La simulation acoustique est effectuée en utilisant une boîte d'air qui entoure le moteur, nous ajoutons des points de mesures au tour du moteur qui seront les micros qui nous permettront de calculer un niveau de pression acoustique. Le maillage de la zone d'air est constitué des éléments suivants :

- Rayon de cylindre 0.15 m
- Taille des éléments 0.0015 m

Le maillage du moteur est constitué des éléments suivants :

- Rayon de la zone de calcul 0.2 m

Taille des éléments 0.0006 m. La figure 13 représente le maillage pour le calcul du bruit.

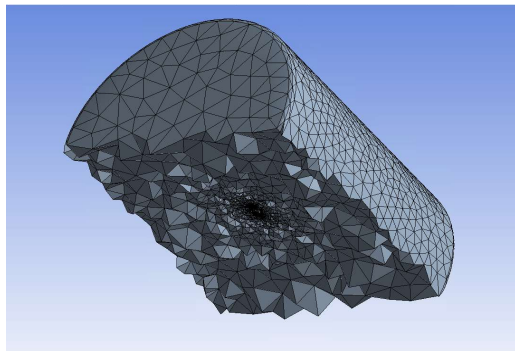


Figure.13 Maillage pour calcul acoustique

Nous avons : 164 189 Nœuds, 116 771 éléments. Le temps de calcul avec 12 cœurs est de 1h15, avec 515 GB de ram et des fréquences des processeurs à 2.4 GHz.

Les simulations donnent les niveaux de pression suivants :

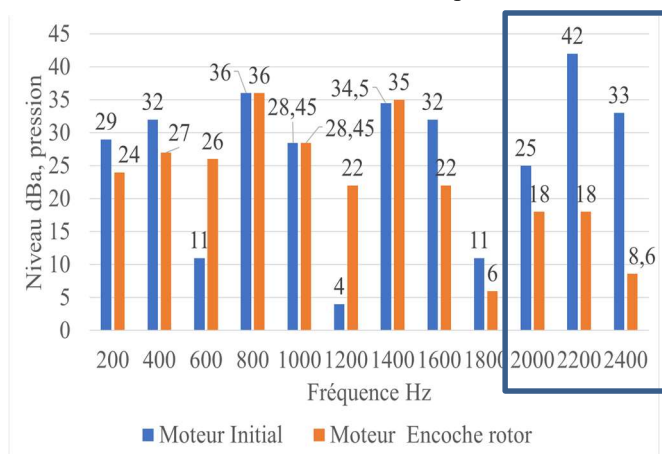


Figure.14 : Résultat de simulation du bruit sur les 2 machines

On observe une réduction de 7 db sur la raie à 20 fs (2000 Hz). Sur toutes les fréquences nous avons une réduction du niveau de bruit sur le moteur avec des encoches au rotor à partir de 1600 Hz, la réduction de la raie à 2000 Hz est de 7 db.

Les résultats sont aussi très dépendants de la valeur de l'amortissement que l'on va mettre dans le calcul. Cette valeur a été estimée en lien avec différents articles mais une analyse modale expérimentale nous permettra d'ajuster ces valeurs.

Il faut aussi bien respecter les conditions aux limites que nous mettons pour les calculs vibratoires (fixation des paliers sur la tôle stator), ceci à une forte influence sur le résultat de l'analyse modale et donc sur toute la chaîne Mesure Electrique & Vibro acoustique

5. MESURES ELECTRIQUE ET VIBRO ACOUSTIQUE

5.1 PERFORMANCE ELECTRIQUE

La FEM des 2 moteurs a été mesurée et on les retrouve sur la figure 16.

Table 2 : Valeur Efficace de la FEM pour les 2 machines mesurées

FEM efficace Moteur initial [V]	Moteur avec encoche rotor [V]
27.5	26.2

Nous observons une très bonne adéquation entre la mesure et le calcul de la FEM sur les 2 machines.

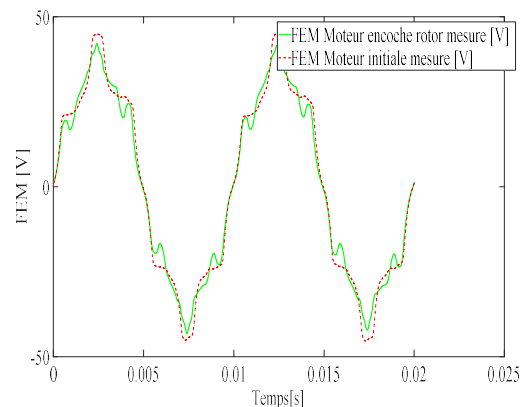


Figure. 15 : FEM mesurée à 3000 rpm sur les 2 Moteurs

5.2 MESURE VIBRO ACOUSTIQUE

La mesure est effectuée avec une tête acoustique pour les mesures acoustiques et un accéléromètre est posé sur le stator du moteur dans une chambre semi anéchoïque.

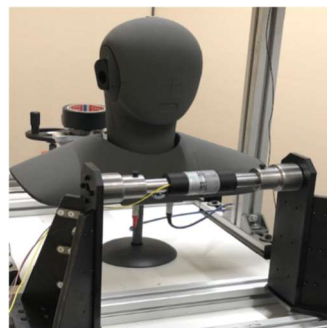
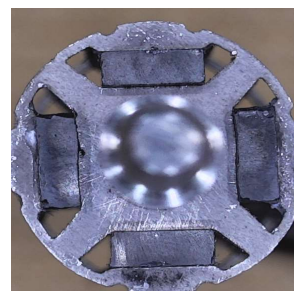


Figure .16 : Photo du montage pour mesure Vibratoire et acoustique
Le moteur est présenté sur la figure 18.



Rotor avec aimant avec 2 encoches encoche



Rotor avec aimant sans encoche

Figure.17 : Photo du stator et du Rotor de la machine

On voit une forte diminution de la raie à 2000 Hz, ce qui est en phase avec nos simulations.

La raie à 8 fs est la dominante comme vue en simulation avec une raie à 20 fs assez forte pour le moteur initial à 112 dB en comparaison des 101 dB sur le moteur avec encoche rotor.

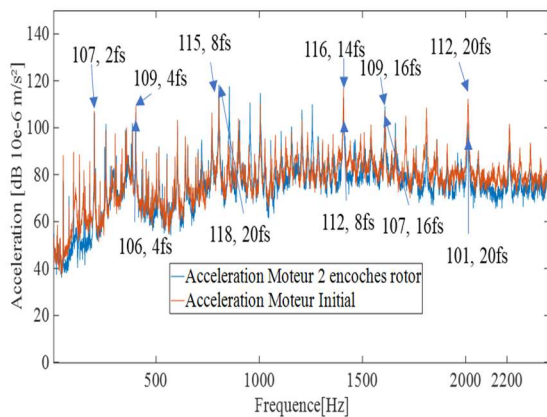


Figure.18 : Résultat de mesure Vibratoire sur les 2 moteurs

Nous observons bien toutes les raies principales observées par simulation, 2,4,6,8,10...20fs

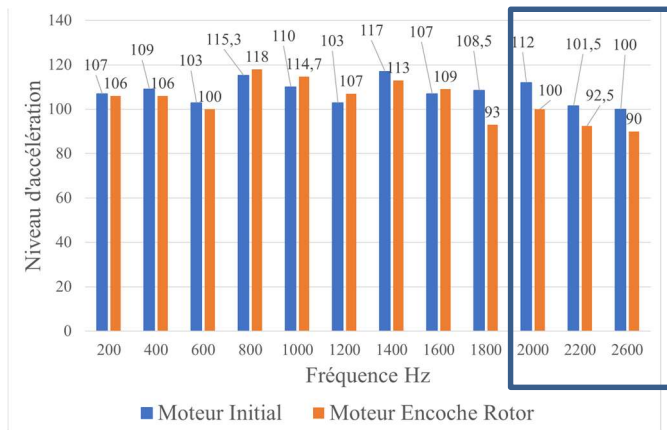


Figure.19 : Mesure Vibratoire sur les 2 machines

Nous retrouvons comme pour la simulation toutes les raies inhérentes à cette structure 6/4, avec une forte raie à 8fs. La raie à 20fs est fortement réduite comme attendu.

Au niveau acoustique, nous pouvons observer que la raie à 800 Hz d'ordre 2 ressort beaucoup plus que la raie à 20 fs d'ordre 2. On pense que cela est lié à un effet d'excentricité renforcé en lien avec l'apparition de raies multiples de 50Hz (non placé sur ce graphe).

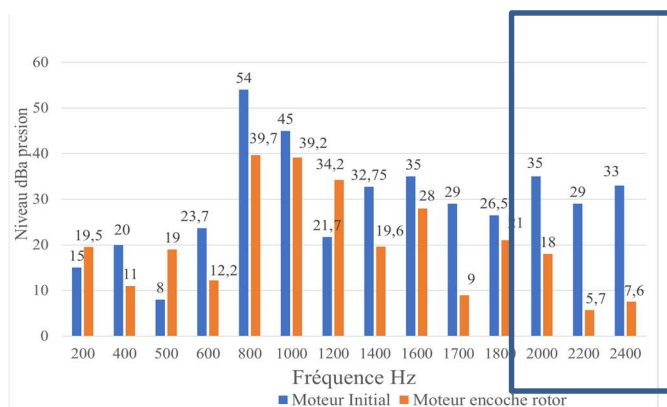


Figure.20 : Mesure Acoustique sur les 2 machines

Néanmoins, le niveau global de ce moteur est moins important. Ceci est dû à l'ajout des encoches fictives. On voit bien que la raie à 20 fs a été réduite de façon importante « - 17 db » en

mesure alors que nous avions « - 7db » par simulation. La tendance est bien respectée sur les raies autour de 2000Hz fortement atténuées par ces encoches fictives.

6. CONCLUSION

Dans cet article, une étude multi-physique d'une machine synchro-réductante a été effectuée, depuis le calcul de la pression radiale jusqu'au niveau de bruit. Cette étude a permis de comparer 2 machines, la première étant la machine de référence et la seconde est celle obtenue par étude paramétrique en ajoutant des encoches fictives au rotor. La position et la dimension de cette encoche a été regardé, une raie haute fréquence a été réduite tout en conservant un niveau de couple moyen nécessaire. Les 2 machines ont été réalisées et ont pu confirmer ce résultat.

Ceci pourrait être fait de la même manière pour tout autre type de machine en fonction de la position des raies acoustiques

Les gains spécifiques obtenus et les améliorations sont les suivants :

- Diminution de la raie à 20 fs autant en vibration qu'en bruit, avec de bonnes tendances entre les simulations et la mesure. Le niveau de bruit n'étant pas attendu avec grande précision, pour cela une analyse modale expérimentale doit être faite pour mieux connaître les coefficients d'amortissement des modes propres.
- Conservation des performances électriques de la machine
- La modélisation des liaisons mécaniques du moteur est un point important et nécessite une modélisation la plus proche possible de la réalité pour obtenir les bonnes variations en terme de vibro-acoustique.

En ce qui concerne les perspectives, il sera nécessaire au niveau de notre modèle E.F. d'intégrer l'effet de l'excentricité dynamique qui a été observé sur nos mesures acoustiques.

7. REFERENCES

- [1] Luigi Marino, "Design and Analysis of a Fractional-Slot Concentrated-Wound PM-Assisted Reluctance Motor", Degree project in electric power engineering, second level Stockolm, Sweden 2015
- [2] K.Wang, Z.Q.Zhu, G.Ombach, M.Koch, S.Zhang, J.Xu, "Optimal Slot/pole and Flux barrier Layer Number Combinations for Synchronous Reluctance machines", 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)
- [3] Yong Liu, Z. Q. Zhu and David Howe, "Direct Torque Control of Brushless DC Drives With Reduced Torque Ripple", IEEE Trans On Industry Applications, vol41, N°2, March/April2005.
- [4] Gyeong-Deuk Lee, Gyu -Tak Kim : The equilibrium Design of Radial Magnetic force for Reduction of Vibration in IL type BLDC Motor, J electr Eng Technol 2016
- [5] Weizhong Fei and Patrick Chi-Kwong Luk Electric, "Investigation of Radial Electromagnetic Force Density and Vibration in a Fractional-Slot Interior Permanent Magnet Synchronous Machine", 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition
- [6] T. Tollance, M. Hecquet, F. Gillon, A. Tounzi, "Design of Low Power Motors with Good Compromise Between Ripple Torque and Radial Force", 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)
- [7] F. Chauvicoeur et al., "Alternative lamination stacking technique of stator cores for improved structural damping of electric machines", Proceedings of ISMA 2018 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2018 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics, 2018, p. 4443-4457.
- [8] Andreas Anderson, Torbjörn Thiringer, Electrical machine Accoustic Noise reduction based on rotor surface modification, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)
- [9] In-Jun Yang, Seung-Hyeon Lee, Kang-Been-Lee, Ju Lee, Won-Ho-Kim, Ik-Sang-Jang, DOI 10.119/TMAG.2020.3022844, IEEE Transactions on Magnetics, "Process to Reduce Electromagnetic Vibration by Reducing the Spatial Harmonics of Airgap Flux Density".

- [10] N. Bracikowski, M. Rossi, M. Hecquet, F., P. Brochet, S. Shirinski, "Multi-physics modeling of a permanent magnet synchronous machine by using lumped models", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 59, N°. 6, pages. 2426 -2437, 06/2012.
- [11] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet, P. Brochet, "Characterization and reduction of audible magnetic noise due to PWM supply in induction machines", *IEEE Trans on Industrial Electronics*, Vol. 57, N°. 4, pages. 1288-1295, 04/2010.
- [12] Emre Uygun, Michel Hecquet, Abdel Mounaïm Tounzi, Daniel Depernet, Vincent Lanfranchi, Serge Bruno, Thierry Tollance « Influence of the load angle on magnetic radial forces and torque ripple of a low power permanent magnet synchronous machine », *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020.
- [13] Mehrdad Jafarboland, Hossein Bagherian Farahabadi, *IET Power Application*, 2018, vol. 12 Iss.9, pp 1297 – 1305, "Optimum Design of the stator parameters for noise and vibration reduction in BLDC motor".
- [14] Yanxin Mao, Wenxiang Zhao, Shendao Zhu, Qian Chen, Jinhua Li, DOI 10.1109/TIE.2020.3022530, *IEEE Transactions on industrial Electronics*, "Investigation of Spoke-Type PM Machine with Asymmetric Rotor Considering Modulator Effect of Stator Teeth"
- [15] Shuanglong Wu, Shuguang Zuo, Xudong Wu, Wenzhe Deng, Hongmin Zhong and Yaodan Zhang, 171st Meeting of Acoustical Society of America, Salt Lake city, Utah, 23-27 May 2016, *Structural Acoustics and Vibration : Paper 3aSA10*, "Numerical prediction and analysis of electromagnetic vibration and noise of claw pole alternator".