

# Réduction des ondulations de couple et des efforts radiaux dans une machine à réluctance variable

M'Hamed BELHADI<sup>1,2</sup>, Guillaume KREBS<sup>1</sup>, Claude MARCHAND<sup>1</sup>, Hala HANNOUN<sup>2</sup> et Xavier MININGER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Laboratoire de Génie Électrique de Paris, SUPELEC, Paris-Sud, UPMC Paris 06, CNRS (UMR 8507)

11, rue Joliot Curie, Plateau de Moulon, 91192 Gif sur Yvette, France

<sup>2</sup> : RENAULT, 1 avenue du Golf, 78288 Guyancourt

**RESUME**-Pour une utilisation de la machine à réluctance variable double saillance (MRV) en traction électrique, et en particulier pour l'automobile, des solutions aux problèmes d'ondulations de couple et de vibrations de ces machines doivent être proposées. Dans ces travaux, une cale d'encoche magnétique est introduite dans la géométrie afin de réduire l'impact des forces radiales appliquées sur les dents statoriques, ces forces étant à l'origine des comportements vibro-acoustiques indésirables. En outre, cette solution permet de réduire les ondulations de couple responsables des vibrations du groupe motopulseur.

*Mots-clés - Machine à réluctance variable, automobile, vibrations, ondulation de couple, force magnétostatique, cale magnétique d'encoche.*

## 1. INTRODUCTION

L'intérêt porté à la machine à réluctance variable ne cesse d'augmenter, aussi bien en termes de recherches qu'en termes d'industrialisation, notamment dans le domaine d'automobile. Ceci est dû essentiellement au développement de l'électronique de puissance et aux avantages présentés par ce type de machines[1] : simplicité de fabrication, robustesse, fiabilité, faible coût de fabrication et de maintenance, fonctionnement dans des environnements sévères (hautes vitesses, températures élevées)...

Néanmoins, les ondulations de couple et le mauvais comportement vibro-acoustique restent deux inconvénients majeurs de la MRV. Le problème de bruit est principalement lié aux efforts radiaux d'origine magnétique sur les dents statoriques. Pour y remédier, deux approches principales peuvent être retenues: la commande de la MRV et sa conception. Notre démarche s'inscrit dans la deuxième approche.

Concernant la minimisation des vibrations, les travaux de [2] et [3] proposent une étude de l'influence des paramètres géométriques du stator sur le comportement vibro-acoustique des MRV. Plusieurs études proposent des solutions purement géométriques, comme par exemple les travaux dans [4] qui considèrent un arrondi au niveau des dents statoriques et les travaux de [5] qui le considèrent au niveau du rotor. Dans [6], les auteurs proposent d'ajouter un trou au niveau du rotor afin de réduire la force radiale, notamment en position de

conjonction. Dans[7], l'auteur a opté pour une solution plus complexe qui consiste à modifier l'inclinaison axiale des dents. Enfin, dans [8] les auteurs proposent une démarche de conception qui considère le critère vibro-acoustique directement dans le cahier des charges. D'autre part, il existe certaines solutions actives, comme par exemple l'ajout de bobinages auxiliaires actifs (alimentés), proposé par [9], permettant de réduire un harmonique bien ciblé de force radiale. Les auteurs dans [10] proposent d'utiliser un matériau piézoélectrique comme solution pour la compensation. Enfin dans [11], les auteurs optent pour un ajout de bobinages en court-circuité au niveau du rotor et/ou du stator.

En ce qui concerne les ondulations de couple, l'étude proposée dans [13] récapitule les différentes possibilités pour les réduire en modifiant le diamètre de rotor et/ou de stator, la longueur de paquet de tôles, les arcs polaires, les formes des pôles, le nombre des phases et/ou leur multiplicité. Les travaux de [14] proposent une analyse statique des ondulations de couple en fonction de la forme des pôles. Vu que les ondulations de couple sont liées, entre autre, aux ouvertures des pôles, les articles [15] à [19] effectuent une optimisation de ces paramètres en statique. Une autre démarche consiste à modifier la forme des dents, comme par exemple dans [20] et [21], où les auteurs proposent une entaille au niveau de la dent rotorique, permettant une linéarisation de l'inductance propre. Un pied de dent rotorique et un entrefer asymétrique ont été étudiés pour un seul point de fonctionnement dans [22] et en statique dans [23] et [24]. L'étude dans [25] s'intéresse à l'influence des barrières de flux (trous au rotor) sur ces ondulations. Enfin, les auteurs de [26] et [27] optent pour une optimisation multi-objective de la MRV en considérant les ouvertures polaires et les angles de contrôle.

Dans ce travail, nous proposons une modification du stator par l'ajout d'une cale d'encoche magnétique entre les dents. Elle est positionnée en bas de l'encoche, et permet de canaliser certaines lignes de champ ce qui modifie le comportement magnétique de la machine. Le but de la cale est de réduire la force radiale et les ondulations de couple pour un ensemble de points de fonctionnement, permettant ainsi de remédier simultanément aux deux inconvénients de la MRV.

Dans ce papier, une étude comparative entre la MRV classique et une MRV avec cale est donc effectuée en régime statique (modélisation électromagnétique) et en fonctionnement (modélisation analytique temporelle) incluant plusieurs vitesses. On présente dans un premier temps les géométries des deux machines puis une comparaison des distributions de lignes de champ et des courbes de magnétisation sera détaillée. Par la suite, les résultats liés à la comparaison sur plusieurs points de fonctionnement (couple-vitesse) en régime permanent seront présentés. Les caractéristiques considérées dans cette partie sont principalement les courbes enveloppes, les analyses harmoniques de la force radiale et des ondulations de couple, les cartographies à minimum d'ondulations.

## 2. PRESENTATION DE LA MRV AVEC CALE MAGNETIQUE

La MRV avec cale magnétique d'encoche (*MRV\_cale*) possède une structure classique ainsi qu'une cale d'encoche en matériau magnétique (cf. fig.1.b). Afin de l'étudier, elle a été modélisée numériquement et confrontée à une MRV à double saillance classique (cf. fig.1.a), appelée ici "*MRV\_orig*", qui sert de référence. Elle est triphasée et conçue pour une application de traction électrique dans le domaine de l'automobile.

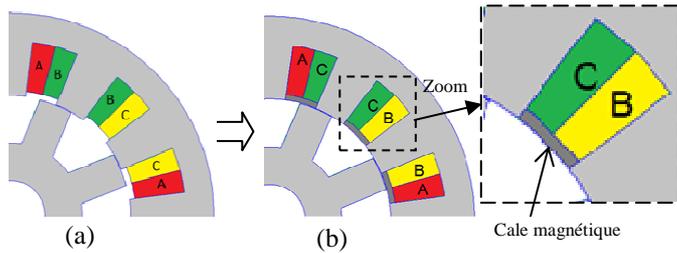


Fig. 1 Structures des MRV, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*

Les deux machines ont quasiment les mêmes paramètres en termes de dimensions et de structure. Dans la *MRV\_cale*, la cale magnétique est ajoutée au niveau des pieds de dent statorique. La courbe de magnétisation B(H) de la cale est différente de celle des autres parties de la machine. La courbe de magnétisation d'une poudre magnétique a été choisie afin de limiter les pertes fer mais aussi de limiter le flux de fuite. La hauteur de la cale a été choisie afin de limiter la perte en couple moyen dû au flux de fuite (Fig. 2, Fig. 4).

## 3. ETUDE MAGNETOSTATIQUE

Tout au long de cet article, les valeurs des différentes variables sont normalisées par rapport aux valeurs de la machine originale. Dans un premier temps, une étude magnéto-statique a été effectuée.

### 3.1. Distribution des lignes de champ

La première caractéristique à analyser est la distribution des lignes de champ magnétique dans les deux machines (Fig.

2). Ces lignes sont présentées pour les deux positions caractéristiques (conjonction et opposition) et pour le courant maximum d'alimentation. Elles sont obtenues à l'aide de l'outil Femm 4.2 [28], logiciel libre utilisant la méthode des éléments finis en deux dimensions.

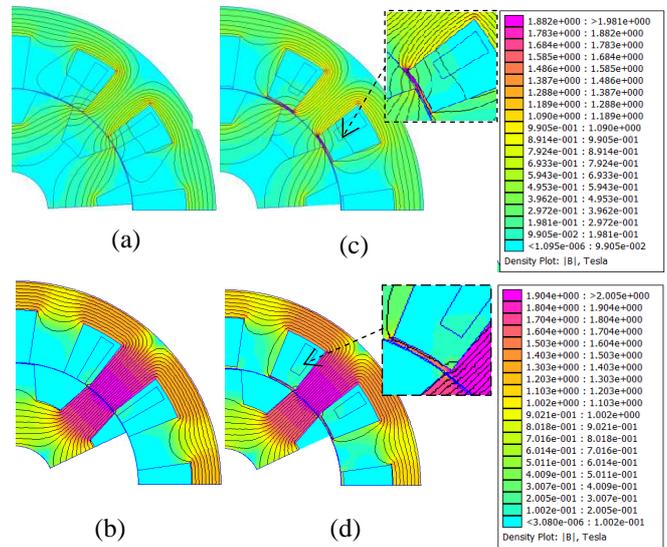


Fig. 2 Lignes de champ dans les deux machines, (a) *MRV\_orig* en opposition, (b) *MRV\_orig* en conjunction, (c) *MRV\_cale* en opposition, (d) *MRV\_cale* en conjunction

Les lignes de champ sont assez similaires pour les deux machines. Il y a cependant plus de lignes de fuite dans la machine avec cale, ceci étant lié au « court-circuit magnétique » formé par ces dernières. Ce flux de fuite peut avoir un impact négatif sur le couple développé par la *MRV\_cale*. En position d'opposition, la cale a tendance à se saturer contrairement aux autres parties de la MRV.

### 3.2. Courbes de magnétisation

Le deuxième élément à comparer concerne les courbes de magnétisation. La figure 3 présente le flux par spire en fonction du courant d'alimentation des deux machines pour les deux positions extrêmes.

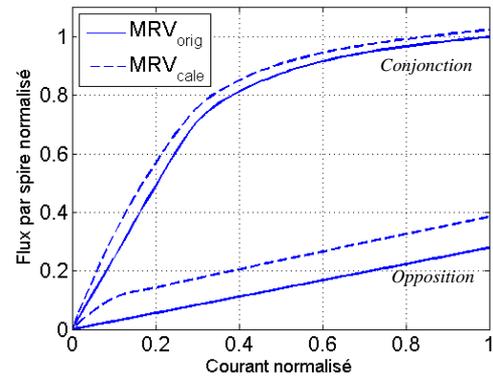


Fig. 3 Courbes de magnétisation dans les deux machines

Dans la *MRV\_cale*, le flux est augmenté par rapport à la machine originale, notamment en position d'opposition. Ce phénomène est dû aux flux de fuite. Comme le montre la figure 3, la surface de conversion d'énergie est réduite d'environ 9% dans la *MRV\_cale*, diminuant ainsi le couple moyen.

En position d'opposition, un autre phénomène est observé : la cale introduit une variation non-linéaire du flux en fonction du courant, non présente pour la machine originale. Le flux dans cette position passe en partie dans les cales (Fig. 2 c d), ce qui provoque la saturation de ces dernières et par conséquent cette non-linéarité.

### 3.3. Couple monophasé

Afin d'évaluer directement l'influence de la cale sur le couple de la MRV, la figure 4 présente le couple monophasé en fonction de la position rotorique ainsi que sa valeur moyen en fonction du courant d'alimentation. Dans cette étude, le couple monophasé est obtenu en alimentant une seule phase par un courant constant tout en faisant tourner le rotor de la position d'opposition à celle de conjonction..

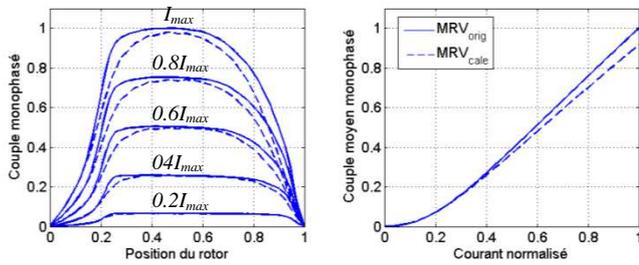


Fig. 4 Couples monophasés, (a) valeurs vs position rotorique, (b) valeurs moyennes

A faible courant, l'influence de la cale sur couple est assez négligeable. En effet pour les premières valeurs du courant, les couples monophasés des deux moteurs ont quasiment la même allure (Fig. 4 a) et leurs valeurs moyenne sont égales (Fig. 4 b). Au-delà d'une valeur de 0.35 du courant d'alimentation, un écart commence à apparaître entre les couples des deux machines. A partir de ce point, la *MRV\_cale* développe moins de couple comparée à la *MRV\_orig*, notamment au voisinage de la position de conjonction. En conclusion, la cale magnétique d'encoche est plus influente à fort courant, réduisant ainsi le couple développé par la *MRV\_cale* dans ces conditions. Ceci est dû essentiellement au flux de fuite canalisé par la cale, qui est plus important à des valeurs élevées de courant.

## 4. ETUDE EN FONCTIONNEMENT

Cette étude consiste à analyser les allures instantanées du couple et de la force radiale en régime permanent, en considérant plusieurs points du plan couple-vitesse, repartis sur toute la plage de fonctionnement de la machine.

### 4.1. Courbes enveloppes des deux moteurs

L'étude des points de fonctionnement sur les deux courbes enveloppes permet de considérer une large plage de vitesse et une optimisation des paramètres de contrôle. Pour cela, la force magnétique radiale sur la dent statorique, le couple de la machine et ses ondulations sont essentiellement considérés.

Dans ce type d'application qui nous intéresse, le cahier des charges est généralement fourni sous forme d'une courbe enveloppe. Cette courbe est définie comme étant le couple moyen maximum développé par la machine pour l'ensemble des vitesses de fonctionnement, en l'alimentant par son courant maximum et sa tension maximale. L'optimisation des paramètres de contrôle (angle de conduction  $\theta$ , angle d'amorçage  $\psi$ , courant de référence  $I_{ref}$ ) (cf. Fig. 5.) est prise en compte avec la méthode développée dans [1].

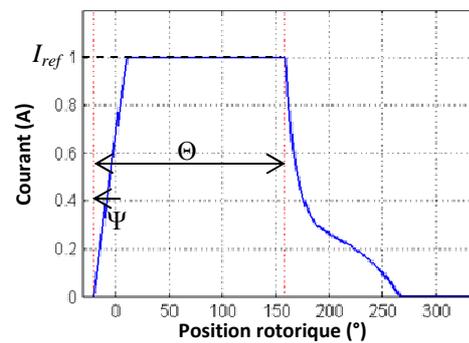


Fig. 5 Courant d'alimentation et paramètres de contrôle

Dans notre cas, la détermination de la courbe enveloppe est effectuée à l'aide du logiciel de laboratoire 'MRVSIM' [29]. MRVSIM est un code de dimensionnement des machines à réductance variable classiques à double saillance, développé sous l'environnement MATLAB<sup>®</sup>. Le logiciel considère l'ensemble machine-convertisseur. En exploitant des modèles analytiques ou/et numériques et en prenant en compte l'optimisation des paramètres du contrôle, il permet de déterminer les différentes caractéristiques de chaque point de fonctionnement. En effet, le code utilise un calcul élément fini (EF) ou analytique pour déterminer les cartographies du couple, du flux et de la force radiale en fonction du courant et de la position. En exploitant ces caractéristiques, l'optimisation des paramètres de contrôle permet l'obtention de la courbe enveloppe.

La figure 6 présente, d'une part, les couples moyens développés par chaque machine afin de les comparer. D'autre part, elle montre les ondulations de couples et les forces radiales moyennes appliquées sur une dent statorique afin d'analyser leurs évolutions pour les points de fonctionnement de la courbe enveloppe. Comme les niveaux de couple atteints ne sont pas les mêmes pour les deux machines, une analyse approfondie de la force radiale sera présentée dans les sections suivantes.

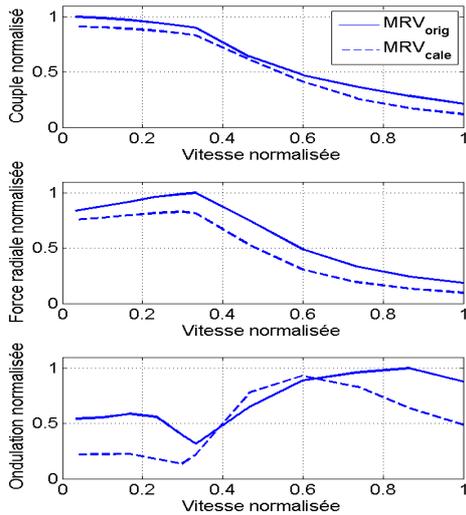


Fig. 6 Courbes enveloppes, (a) couple moyen vs. vitesse, (b) force radiale vs. vitesse (c) ondulation de couple vs. vitesse

Au-dessous de la vitesse de base, les couples des deux machines restent quasi-constants mais au-delà, l'augmentation de la vitesse entraîne une diminution des couples développés. Ceci est dû à la force électromotrice (f.é.m.) qui limite le courant d'alimentation et par conséquent le couple moyen. Cette même f.é.m. conduit au même comportement pour la composante radiale de force exercée sur la dent statorique.

L'introduction des cales magnétiques dégrade la courbe enveloppe, en moyenne de 16%, mais en contrepartie elles permettent de réduire de 26% en moyenne la force radiale sur la dent statorique. Cette dégradation est une conséquence directe de la réduction de la surface de conversion d'énergie pour la machine avec cale (cf. Fig. 3). La dégradation de la courbe enveloppe est moins importante aux faibles vitesses qu'aux très hautes vitesses. Pour ces dernières, la surface de conversion est moins importante pour la *MRV\_cale* à cause de la saturation observée en opposition. Une optimisation du choix de la courbe B(H) et de la hauteur de la cale est souhaitable afin d'améliorer la courbe enveloppe de la *MRV\_cale*, tout en gardant l'avantage au niveau de la force radiale.

A l'origine des vibrations de la chaîne de traction, les ondulations de couple constituent un critère important pour évaluer les deux machines. La dégradation de la courbe enveloppe de *MRV\_cale* par rapport à la *MRV\_orig* s'accompagne aussi par une réduction des ondulations de couple (en moyenne de -38%), notamment à faible vitesse (-50%). C'est un avantage majeur car aux hautes et moyennes vitesses, la filtration mécanique et l'inertie du moteur se chargeront d'atténuer ces ondulations. Aux faibles vitesses, les ondulations de couple seront par contre transmises directement à la roue, ce qui peut être gênant pour le conducteur. Cette réduction des ondulations est due essentiellement au couple

négatif créé lors de la phase de la démagnétisation, qui est moins important dans la *MRV\_cale* (moins de flux de fuite).

#### 4.1.1. Analyse spectrale

Dans le but d'analyser plus précisément les ondulations de couple et la force radiale, une étude spectrale est considérée dans cette section. Cette représentation est mieux adaptée que celle en valeurs moyennes (Fig. 6 c b), notamment pour la force radiale. En effet, les harmoniques de couple vont exciter le groupe motopropulseur alors que ceux de la force vont exciter la structure statorique. Une présentation spectrale sous forme de sonagrammes du couple et de la force est détaillée sur les « Fig. 7, Fig. 8, Fig. 10 et Fig. 11 ». On représente les fréquences-amplitudes des harmoniques afin de voir leurs évolutions spectrales en fonction de la vitesse pour les deux moteurs.

Les sonagrammes du couple et de la force radiale présentés sur les figures suivantes (cf. Fig. 7 et Fig. 8) ont été obtenus pour les points de fonctionnement de la courbe enveloppe.

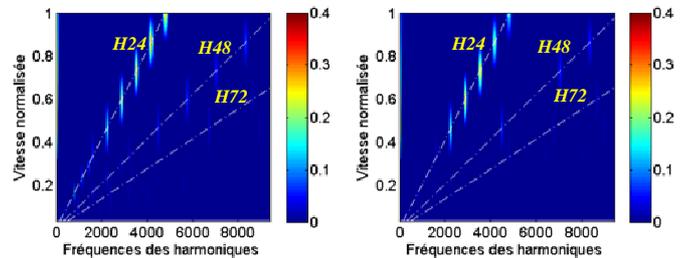


Fig. 7 Sonagrammes des couples, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*

Rappelons que les fréquences des harmoniques du couple et de la force sont liées directement à la fréquence mécanique (la vitesse de rotation). Elles sont calculées comme suit :

Fréquence mécanique :  $f_{mec} = vitesse/60$

Fréquences des harmoniques du couple :  $f_c = f_{mec} q N_r k$

Fréquences des harmoniques de la force radiale :  $f_f = f_{mec} N_r k$   
où  $q$ ,  $N_r$  et  $k$  sont respectivement le nombre de phases, le nombre de dents rotoriques et un entier positif.

Les harmoniques du couple ainsi que de la force dépendent de la vitesse de rotation et de la structure du rotor. Comme une structure identique est adoptée pour les deux machines, elles ont des harmoniques de mêmes rangs. Les fréquences de ces harmoniques sont des multiples de  $q N_r$  pour le couple et de  $N_r$  pour la force radiale.

Sur le plan fréquence-vitesse, les harmoniques du couple sont situés sur des droites de pentes  $60/q N_r k$  avec  $k=1..n$ . Les deux premiers harmoniques ont des amplitudes assez importantes contrairement aux autres harmoniques qui sont ici négligeables. Ces amplitudes importantes sont susceptibles d'exciter des vibrations de la chaîne de traction (groupe motopropulseur).

La figure (Fig. 8) illustre le sonagramme de la force radiale exercée sur une dent de stator.

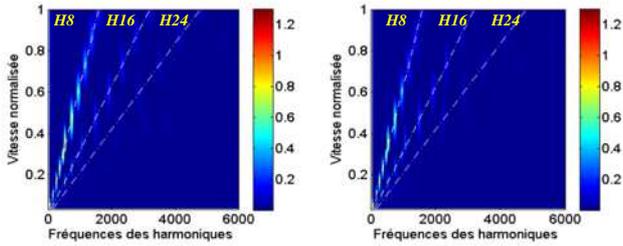


Fig. 8 Sonagrammes des forces magnétiques radiales, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*

Les harmoniques de la force radiale sont situés dans le plan fréquences-vitesse sur des droites de pente  $(60/N_r k)$ . En analysant les deux sonagrammes des forces radiales, on remarque que les trois premiers harmoniques ( $\{1, 2, 3\} * N_r$ ) sont les plus dominants. La machine avec cale possède des harmoniques moins importants quelle que soit la vitesse, la fréquence ou le couple considérés. Cet écart peut aller jusqu'à 25%.

#### 4.2. Comparaison à iso courbe enveloppe

Dans cette section, la même courbe enveloppe (iso-couple) est considérée pour les deux moteurs (cf. Fig. 8 a). Pour ce faire, le courant d'alimentation de la machine originale est diminué en réduisant le courant de référence. Cette considération avec la même courbe enveloppe permet une comparaison plus justifiée des deux machines, qui sont ici considérées pour les mêmes points de fonctionnement. La Fig. 9 illustre les résultats obtenus pour les deux moteurs dans cette configuration.

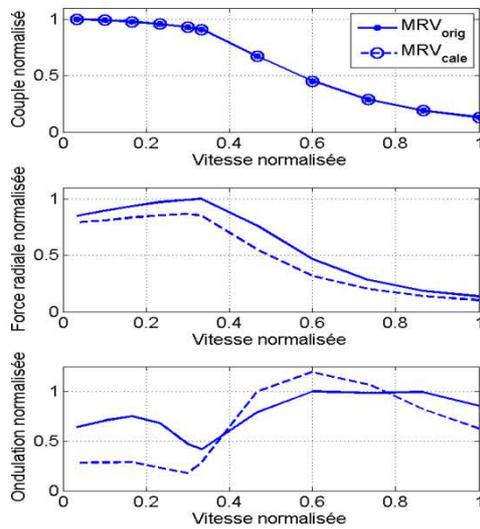


Fig. 9 Comparaison à iso-courbe enveloppe, (a) couple-moyen vs vitesse, (b) force-radiale vs vitesse, (c) ondulations-de-couple vs vitesse

Bien que l'excitation de la *MRV\_orig* ait diminuée, la force radiale reste toujours plus importante dans le cas de la

machine originale sur toute la plage de fonctionnement. L'écart entre les deux est en moyenne de -19%. Pour les ondulations de couple, la *MRV\_cale* présente un avantage, notamment à faible vitesse où l'écart peut atteindre les 50%. La *MRV\_cale* présente un avantage notamment à ces faibles vitesses où la filtration mécanique est moins performante.

Suite à cette comparaison à iso-couple, la machine avec cale est la plus avantageuse en termes d'ondulations de couple ou bien en terme de la force radiale.

#### 4.2.1. Analyse spectrale à iso couple

Dans le but d'approfondir la comparaison à iso-points de fonctionnement, une représentation spectrale du couple et de la force radiale sous forme de deux sonagrammes est donnée (cf. Fig. 9 et Fig. 10). Les différences entre les deux sonagrammes (les harmoniques de *MRV\_cale* moins les harmoniques de la *MRV\_orig*) sont présentées dans les mêmes figures.

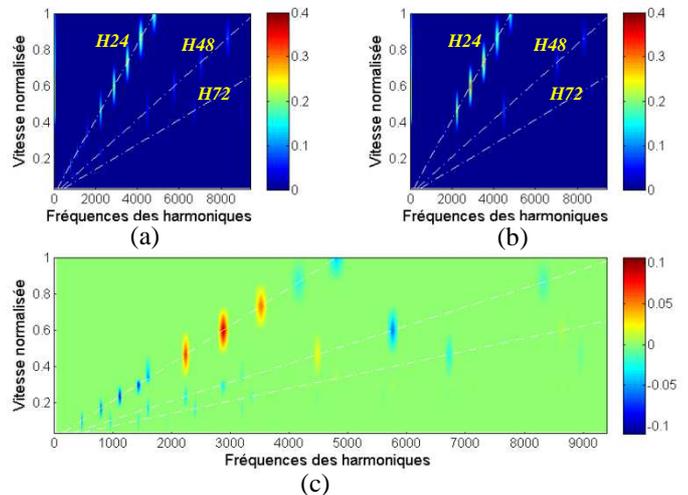


Fig. 10 Sonagrammes des couples à iso-courbe enveloppe, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*, (c) écart entre les sonagrammes

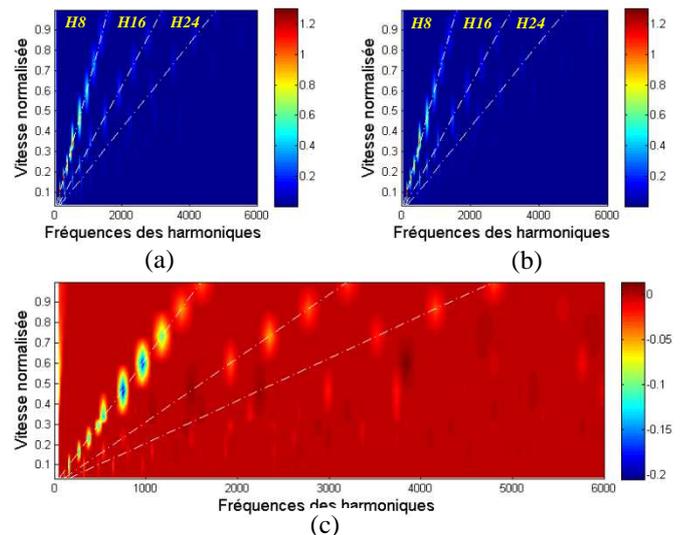


Fig. 11 Sonagrammes des forces radiales à iso-courbe enveloppe, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*, (c) écart entre les sonagrammes

Pour les deux sonagrammes, les constatations observées précédemment sur des courbes enveloppes différentes restent toujours valables : les harmoniques les plus dominants sont les deux premiers pour le couple et sont les trois premiers pour la force. De plus, les différents harmoniques suivent quasiment la même évolution pour les deux machines.

A l'exception de l'harmonique de rang  $(I * q * N_r)$  pour les vitesses (0.5 et 0.6), on a globalement moins d'harmoniques du couple dans la machine avec cale sur tout le plan fréquence-vitesse. Ceci présente un avantage en faveur de la *MRV\_cale*. Ce résultat est en accord avec les constatations au niveau des ondulations de couple dans la section précédente. Concernant la force radiale, quelles que soient la vitesse ou la fréquence considérée, le moteur avec cale conduit à un contenu harmonique moins important. La différence entre les deux MRV peut atteindre 21%.

En conclusion, dans le cas de figure à iso-couple, la *MRV\_cale* reste la plus avantageuse comparée à la *MRV\_orig* car ses contenus harmoniques du couple et de la force radiale sont les moins importants.

5. CARTOGRAPHIES A MINIMUM D'ONDULATIONS

Afin de considérer toute la plage de fonctionnement, une comparaison à base des cartographies à minimum d'ondulations de couple a été effectuée. Ceci consiste à chercher les paramètres de contrôle ( $\theta, \psi, I_{ref}$ ) qui permettent de minimiser les ondulations de couple sur toute la plage de fonctionnement [30]. D'autres critères pourraient être choisis, notamment la minimisation de la force radiale et la maximisation de rendement.

La figure suivante (Fig. 12) présente la cartographie des ondulations de la MRV originale et celles de la MRV avec cale, ainsi que leur différence (les ondulations de la *MRV\_cale* moins les ondulations de *MRV\_orig*).

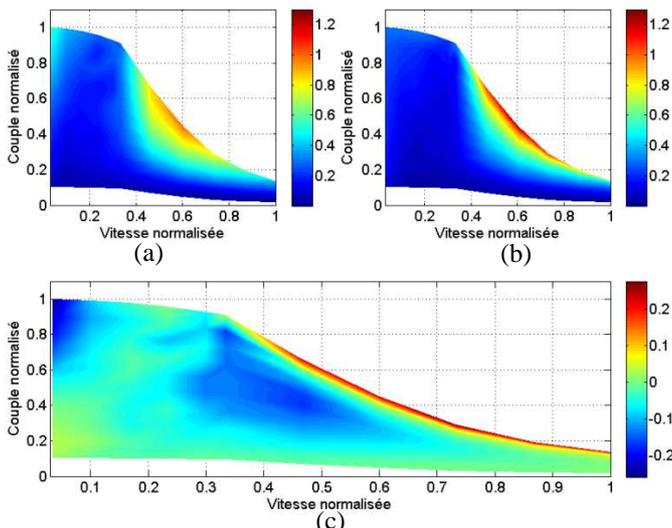


Fig. 12 Cartographie à minimum d'ondulations, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*, (c) différence

Pour les deux MRV, on remarque que le couple est plus ondulé au-delà de la vitesse de base et voisinage de la courbe enveloppe. Ceci est dû, d'une part, au choix des paramètres de contrôle qui est limité dans cette plage et à la forme du courant d'autre part.

En comparant les deux machines, on a globalement moins d'ondulations dans la machine avec cale comparée à la *MRV\_orig*. L'écart entre les deux est cependant moins important que lors de la comparaison à iso-couple. Une exception peut être signalée : au voisinage de la courbe enveloppe et en haute vitesse, on a plus d'ondulations dans la *MRV\_cale* car dans cette plage le choix sur les paramètres de contrôle est plus limité que pour la *MRV\_orig*. En effet, dans ces conditions, la *MRV\_cale* fonctionne sur sa courbe enveloppe ( $I_{ref}=I_{max}$  et  $\psi=180^\circ$ ) contrairement à la *MRV\_orig*.

Le choix des paramètres de contrôle est ici effectué dans le but de réduire les ondulations du couple des deux machines. Les cartographies correspondantes de la force radiale sont présentées en Fig. 13.

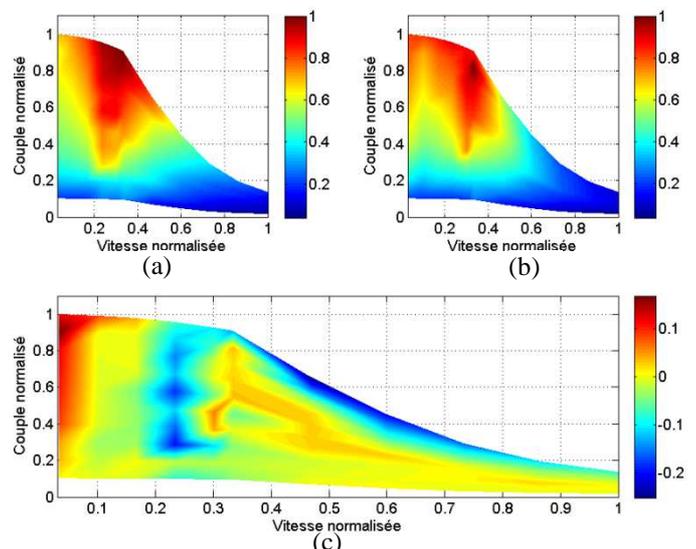


Fig. 13 Forces radiales correspondantes aux cartographies à minimum d'ondulations, (a) *MRV\_orig*, (b) *MRV\_cale*, (c) différences

Sur toute la plage de fonctionnement, on remarque que la machine avec cale présente une force radiale plus faible sur une majeure partie de la plage de fonctionnement. L'écart peut atteindre -25%.

Cette dernière comparaison à base des cartographies confirme que la *MRV\_cale* reste la plus avantageuse en terme d'ondulation couple et de force radiale.

6. CONCLUSION

Dans ce papier, une machine à reluctance variable avec cale a été dimensionnée, modélisée numériquement et enfin analysée. Elle a été confrontée à une machine à reluctance variable à double saillance classique équivalente en effectuant essentiellement des comparaisons en magnétostatique (lignes

de champ, flux...) puis en fonctionnement (courbes enveloppes, cartographies...).

En position d'opposition, la cale qui canalise un flux de fuite a tendance à se saturer. Cette saturation réduit légèrement la surface de conversion d'énergie qui affecte sa courbe enveloppe de la MRV\_cale. Malgré une dégradation de sa courbe enveloppe, nous avons constaté en contrepartie un avantage en faveur de la machine avec cale de point de vue de la force radiale (réduction de sa valeur moyenne et ses harmoniques) et au niveau des ondulations de couple notamment à faible vitesse. La comparaison effectuée pour les mêmes points de fonctionnement a permis de déceler un avantage assez intéressant en faveur de la machine avec cale. En effet, cette machine a un contenu harmonique moins important que la MRV\_orig, aussi bien pour la force radiale que pour les ondulations de couple. La dernière comparaison a été effectuée sur toute la plage de fonctionnement, en optant pour les cartographies à minimum d'ondulations. Elle a confirmé l'intérêt sur l'ensemble de points de fonctionnement de la MRV\_cale, malgré un écart moins important que sur les courbes enveloppes.

Afin de compléter cette étude plusieurs axes peuvent être considérés comme par exemple : comparaison à l'aide de la commande instantanée de couple, étude de l'effet de la mutuelle entre les phases (possibilité d'une contribution au couple développé), influence de la saturation de la cale sur la commande et enfin considération d'autres cartographies (maximum de rendement, minimum de force radiale...).

## 7. REFERENCES

- [1] H. Hannoun, M. Hilairret, and C. Marchand, "Design of an SRM Speed Control Strategy for a Wide Range of Operating Speeds," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 2911–2921, 2010.
- [2] M. Besbes, C. Picod, F. Camus, and M. Gabsi, "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors," *Electr. Power Appl. IEE Proc.* -, vol. 145, no. 5, pp. 462–468, Sep. 1998.
- [3] M. Besbes, "influence de nombre de dents sur le comportement des MRV," presented at the EF'99, Lille, 1999, pp. 404–408.
- [4] X. Deng, Q. Yuan, J. Lu, and X. Li, "Study on the Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Motor," in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 2009, pp. 1–4.
- [5] S. P. Randall, "Noise reduction in reluctance machines," brevet, US6072260 A06-Jun-2000.
- [6] K. Nakata, K. Hiramoto, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Noise reduction for switched reluctance motor with a hole," in *Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002. Proceedings of the*, 2002, vol. 3, pp. 971–976.
- [7] S. Ayari, "Etude des vibrations des machines à reluctance variable: influence des caractéristiques géométriques et de l'excentricité rotorique," Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2000.
- [8] M. N. Anwar and I. Husain, "Design perspectives of a low acoustic noise switched reluctance machine," in *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, 2000, vol. 1, pp. 99–106.
- [9] J. P. Lecointe, R. Romary, J.-F. Brudny, and M. McClelland, "Analysis and active reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance motor," *Electr. Power Appl. IEE Proc.* -, vol. 151, no. 6, pp. 725–733, 2004.
- [10] X. Mininger, N. Galopin, X. Ojeda, F. Bouillault, and M. Gabsi, "Modeling of Magnetoelastic and Piezoelectric Coupling: Application to SRM Noise Damping," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1218–1221, Mar. 2009.
- [11] Y. Tang, "Switched reluctance motor with damping windings," brevet, US6008561 A28-Dec-1999.
- [12] "Switched reluctance motor with damping windings," .
- [13] S. Jebarani Evangeline and S. Suresh Kumar, "Torque Ripple Minimization of switched reluctance drives-A survey," in *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on*, 2010, pp. 1–6.
- [14] V. Prabhakar, M. Balaji, S. Ramkumar, and V. Kamaraj, "Influence of stator and rotor profiles on torque ripple minimization in SRM," in *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on*, 2006, pp. 403–406.
- [15] R. T. Naayagi and V. Kamaraj, "Optimum pole arcs for switched reluctance machine with reduced ripple," in *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*, 2005, vol. 1, pp. 761–764.
- [16] M. Balaji and V. Kamaraj, "Design optimization of Switched Reluctance Machine using Particle Swarm Optimization," in *Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference on*, 2011, pp. 164–169.
- [17] B. Qu, J. Song, and J. Zheng, "Torque ripple minimization in switched reluctance machine by pole arcs design," in *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on*, 2009, pp. 2308–2311.
- [18] Y. Ohdachi, Y. Kawase, Y. Miura, and Y. Hayashi, "Optimum design of switched reluctance motors using dynamic finite element analysis," *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 33, no. 2, pp. 2033–2036, 1997.
- [19] N. K. Sheth and K. R. Rajagopal, "Optimum pole arcs for a switched reluctance motor for higher torque with reduced ripple," *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 39, no. 5, pp. 3214–3216, 2003.
- [20] J. W. Lee, H. S. Kim, B. I. Kwon, and B. T. Kim, "New rotor shape design for minimum torque ripple of SRM using FEM," *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 40, no. 2, pp. 754–757, 2004.

- [21] G. jin Li, "Contribution à la Conception des Machines Electriques à Rotor Passif pour des Applications Critiques : Modélisations Electromagnétiques et Thermiques sur Cycle de Fonctionnement, Etude du Fonctionnement en Mode Dégadé," Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2011.
- [22] Y. K. Choi, H. S. Yoon, and C. S. Koh, "Pole-shape optimization of a switched-reluctance motor for torque ripple reduction," *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 43, no. 4, pp. 1797–1800, 2007.
- [23] N. Bhiwapurkar, A. K. Jain, and N. Mohan, "Study of new stator pole geometry for improvement of SRM torque profile," in *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 516–520.
- [24] Y. Ozoglu, M. Garip, and E. Mese, "New pole tip shapes mitigating torque ripple in short pitched and fully pitched switched reluctance motors," in *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, 2002, vol. 1, pp. 43–50 vol.1.
- [25] J. Hur, G. H. Kang, J. Y. Lee, J. P. Hong, and B. K. Lee, "Design and optimization of high torque, low ripple switched reluctance motor with flux barrier for direct drive," in *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, 2004, vol. 1.
- [26] J. H. Choi, S. Kim, J. M. Shin, J. Lee, and S. T. Kim, "The multi-object optimization of switched reluctance motor," in *Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on*, 2003, vol. 1, pp. 195–198.
- [27] Y. H. Kim, J. H. Choi, S. I. Jung, Y. D. Chun, S. Kim, J. Lee, M. S. Chu, K. J. Hong, and D. H. Choi, "Optimal design of switched reluctance motor using two-dimensional finite element method," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 10, pp. 6967–6969, 2002.
- [28] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics (Version 4.2), User's Manual." Oct-2010.
- [29] M. Besbes and B. Multon, "MRVSim code : Logiciel de simulation pour l'aide au dimensionnement des MRVDS et de convertisseur," IDDN.FR.001.430010.000.S.C.2004.000.30645.
- [30] A. Kolli, G. Krebs, X. Mininger, and C. Marchand, "Impact of command parameters on efficiency, torque ripple and vibrations for Switched Reluctance motor," in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2012, pp. 2975–2980.