



**HAL**  
open science

## Reduction des ondulations de couple et des efforts radiaux dans une machine a reluctance variable

M'Hamed Belhadi, Guillaume Krebs, Claude Marchand, Hala Hannoun,  
Mininger Xavier

► **To cite this version:**

M'Hamed Belhadi, Guillaume Krebs, Claude Marchand, Hala Hannoun, Mininger Xavier. Reduc-tion des ondulations de couple et des efforts radiaux dans une machine a reluctance variable. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065260

**HAL Id: hal-01065260**

**<https://hal.science/hal-01065260>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

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

**RESUME** – Pour une utilisation ordinaire de la machine à réluctance variable (MRV) en traction électrique (automobile), des solutions aux problèmes d'ondulations de couple et de vibrations de la machine doivent être proposées. Dans ces travaux, une cale d'encoche magnétique est proposée afin de réduire l'impact de la force radiale appliquée sur la dent statorique, à l'origine des comportements vibro-acoustiques indésirables. En outre, cette solution permet de réduire les ondulations de couple responsables des vibrations du groupe motopropulseur.

**MOTS-CLES** – automobile, cale d'encoche, force magnétostatique, machine à réluctance variable, ondulations de couple.

## 1. Introduction

L'intérêt porté à la machine à réluctance variable (MRV) ne cesse d'augmenter, aussi bien en termes de recherche que d'industrialisation, notamment dans le domaine d'automobile. Ceci est dû aux avantages de ces machines [1]. Néanmoins, elles présentent deux inconvénients majeurs : les ondulations de couple et le comportement vibro-acoustique, lié principalement aux efforts radiaux sur les dents statoriques. Pour y remédier, l'approche « conception » peut être adoptée.

Concernant la minimisation de la force radiale, il existe un certain nombre de solutions purement géométriques : les travaux de [2] considèrent un arrondi au niveau des dents statoriques et ceux de [3] qui placent cet arrondi au niveau du rotor. Dans [4], l'auteur a opté pour une inclinaison axiale des dents. Enfin dans [5], les auteurs proposent une démarche de conception qui intègre un critère vibro - acoustique dans le cahier de charges. Concernant les ondulations de couple, elles sont liées, entre autres, aux ouvertures angulaires des pôles. Ainsi, [6] effectue une optimisation de ces paramètres. Une autre démarche consiste à modifier la forme des dents, comme par exemple dans [7] qui propose un chanfrein au rotor. L'ajout de pied de dent et d'entrefer asymétrique ont été étudiés dans [8]. L'étude [9] s'intéresse à l'influence des barrières de flux sur les ondulations. Enfin, [10] opte pour une optimisation multi-objectif des MRV.

Nous proposons dans ce travail, une modification de la conception du stator par l'ajout d'une cale d'encoche magnétique. Cette dernière va permettre de réduire la force radiale ainsi que les ondulations de couple pour un ensemble de points de fonctionnement, permettant ainsi de remédier aux deux inconvénients simultanément.

Dans ce papier, une étude comparative entre la MRV classique et la MRV avec cale a été effectuée, en régimes statique et dynamique. Nous présentons dans un premier temps, les deux machines puis la comparaison statique est détaillée. Par la suite, les résultats liés à la comparaison en régime dynamique sont donnés.

## 2. Présentation des machines

La machine de référence est une MRV classique triphasée (MRV\_orig) (cf. Fig.1.a). Elle est conçue pour une application de traction électrique dans l'automobile.

La seconde machine est une machine à réluctance variable avec cale (MRV\_cale) (cf. fig.1.b). Elle possède une structure classique ainsi qu'une cale d'encoche en matériau magnétique.

Les deux machines ont les mêmes dimensions et topologie. Dans la MRV\_cale, une cale magnétique est ajoutée au niveau de l'encoche. Le choix de cale a fait l'objet d'une étude paramétrique qui sera présentée dans la version finale.

### 3. Etude statique

Tout le long de la comparaison, les valeurs des grandeurs sont normalisées par rapport à celles de la MRV\_orig.

#### 3.1 Cartes de champ et courbes de magnétisation

Nous présentons les cartes de champ pour deux positions extrêmes : l'opposition (cf. fig.1.a et b) et la conjonction (cf. fig.1.c et d). Les lignes de champ sont assez similaires pour les deux machines. Il y a cependant plus de lignes de fuite dans la MRV\_cale à cause du « court-circuit magnétique » formé par les cales. Ce flux de fuite peut avoir un impact sur le couple développé. En position d'opposition, la cale a tendance à se saturer contrairement aux autres parties de la MRV.

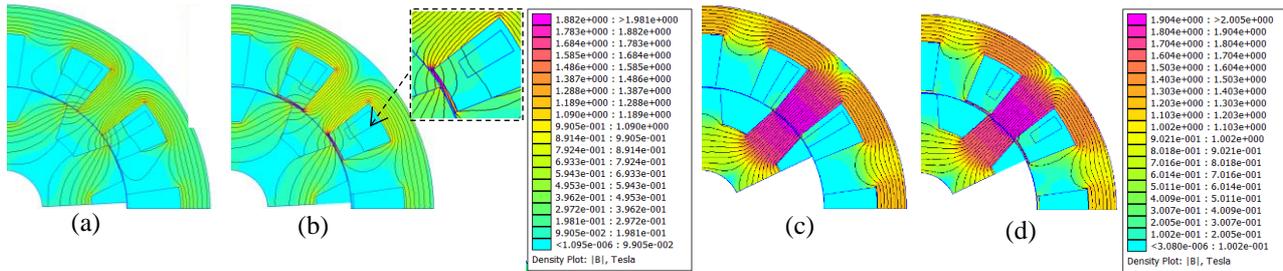


Figure 1 : Les lignes de champs dans les deux machines

La figure 2 présente le flux de phase en fonction du courant d'alimentation de la machine pour les deux positions extrêmes. Dans la MRV\_cale, le flux est augmenté par rapport à la machine originale, notamment en opposition. Ceci est lié au flux de fuite, et comme le montre la figure 2, la surface de conversion est réduite diminuant ainsi le couple.

Pour la position d'opposition, la cale introduit une variation non-linéaire du flux en fonction du courant contrairement à la machine originale. Le flux dans cette position passe en partie dans les cales ce qui provoque la saturation de ces dernières.

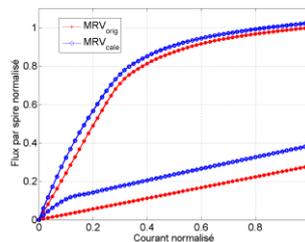


Figure 2 : Courbes de magnétisation dans les deux machines

### 4. Étude dynamique

#### 4.1 Comparaison des courbes enveloppes

La comparaison des deux machines sur leurs courbes enveloppes permet de considérer une large plage de vitesse et une optimisation des paramètres de contrôle. L'article final détaillera la méthode utilisée pour les calculer. Afin d'évaluer les machines, nous comparons (cf. fig.3) la force magnétique radiale sur une dent, le couple et ses ondulations

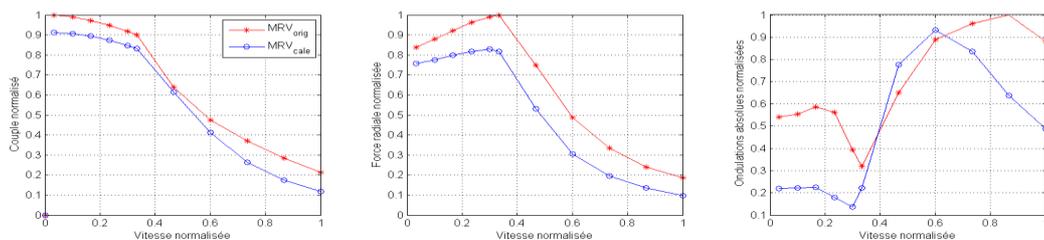


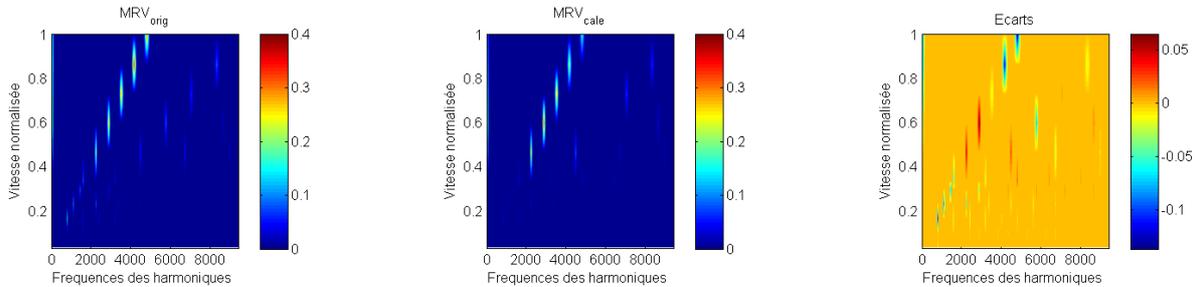
Figure 3 : Comparaison des courbes enveloppes, MRV orig et MRV\_cale

L'introduction des cales dégrade, en moyenne de 16%, la courbe enveloppe, mais en contrepartie elle permet de réduire de 26% en moyenne la force radiale sur la dent statorique. Cette dégradation de couple est plus importante à très haute vitesse qu'à faible vitesse. Elle est la conséquence de la réduction de la surface de conversion pour la machine

avec cale. Une optimisation considérant la courbe B(H) et de la hauteur de la cale est souhaitable. La cale permet aussi de réduire globalement les ondulations de couple d'une manière considérable (en moyenne -38%), notamment à faible vitesse (-50%). Ceci présente un avantage majeur car à haute et moyenne vitesses, la filtration mécanique et l'inertie du moteur réduisent ces ondulations. Cette réduction est due au couple négatif créé lors de la phase de la démagnétisation, qui est moins important dans le cas de la MRV\_cale.

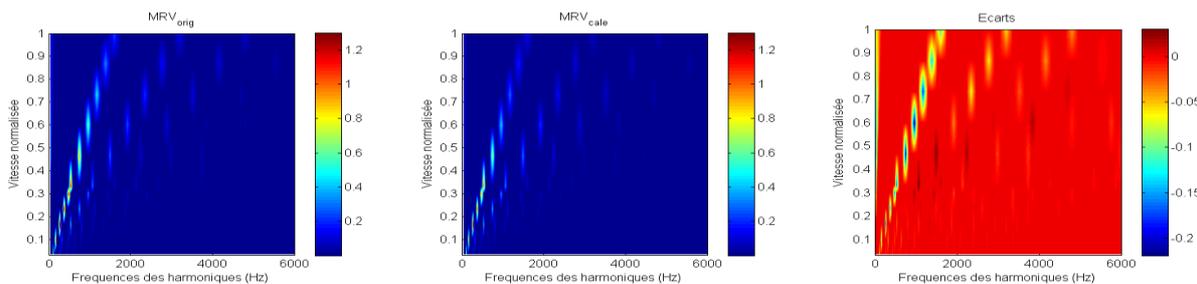
Dans le but d'analyser d'avantage les ondulations de couple et la force radiale nous considérons, par suite, une étude harmonique. En effet, les harmoniques de couple vont exciter le groupe motopulseur alors que ceux de la force vont exciter la structure statorique.

Les sonagrammes de couple (cf. fig. 5) et de la force radiale (cf. fig. 6) présentés sur les figures suivantes ont été obtenus pour des points de fonctionnement de la courbe enveloppe.



**Figure 5 : Sonagramme de couple**

Globalement, nous avons moins d'harmoniques de couple dans la machine avec cale sauf pour le premier harmonique (appelé H24) qui dépasse celui de l'originale pour les vitesses [0.5 et 0.6].



**Figure 6 : Sonagramme de la force magnétique radiale**

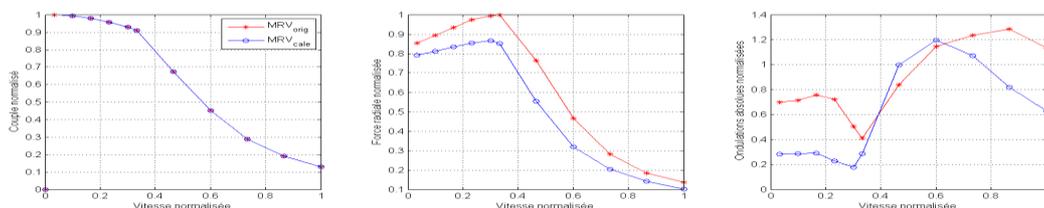
La machine avec cale possède des harmoniques de la force magnétique radiale moins importants quelle que soit la vitesse, la fréquence ou le couple considérés.

## 4.2 Comparaison à iso courbe enveloppe

Nous considérons cette fois la même courbe enveloppe. Pour cela, nous réduisons le courant d'alimentation de la machine originale.

La figure 7 illustre les résultats obtenus. Bien que l'excitation de la MRV\_orig ait diminué, la force radiale reste toujours plus faible dans le cas de avec cale.

Pour les ondulations de couple, la MRV\_cale présente là encore un avantage, notamment à faible vitesse.



**Figure 7 : Comparaison à iso-courbes enveloppes**

Une analyse spectrale (non présentée dans ce résumé), similaire à la précédente, permet de valider les résultats obtenus pour les premiers sonagrammes.

### 4.3 Cartographie à minimum d'ondulations

Afin de considérer toute la plage de fonctionnement et les paramètres de contrôle, nous effectuons une comparaison des cartographies à minimum d'ondulations. Ceci consiste à chercher les paramètres de contrôle qui permettent de minimiser les ondulations de couple. La figure 8 présente les ondulations absolues des deux MRV et l'écart entre elles.

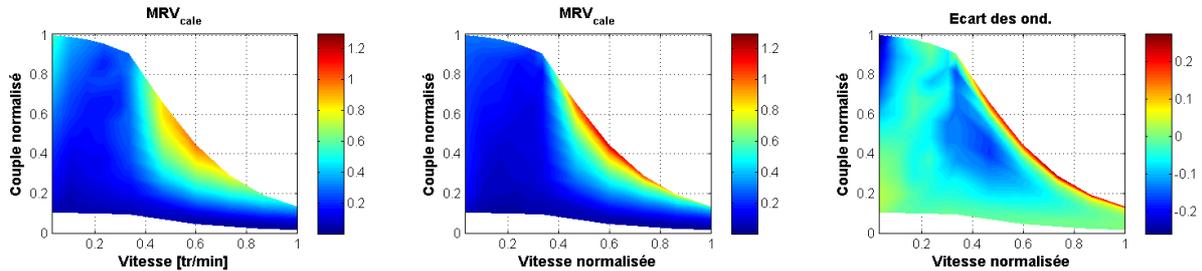


Figure 8 : Cartographie à minimum d'ondulations

Globalement, nous avons moins d'ondulations dans la machine avec cale sauf au voisinage de la courbe enveloppe en haute vitesse car dans cette plage les choix sur les paramètres de contrôle pour la MRV\_cale sont plus limités.

## 5. Conclusion

Dans ce papier, une machine à réluctance variable avec cale magnétique a été conçue, modélisée numériquement et enfin analysée. Elle a été confrontée à une MRV classique en effectuant des comparaisons en statique et en dynamique.

En position d'opposition, la cale a tendance de se saturer à cause du flux de fuite. Cette saturation fait réduire légèrement la surface de conversion d'énergie ce qui affecte donc sa courbe enveloppe. La comparaison des courbes enveloppes, nous a permis de constater un avantage en faveur de la machine avec cale, d'une part au niveau de la force radiale et d'autre part au niveau des ondulations de couple notamment à faible vitesse. La dernière comparaison est effectuée sur toute la plage de fonctionnement, en optant pour les cartographies à minimum d'ondulations. Elle montre aussi l'intérêt sur l'ensemble de points de fonctionnement de la MRV\_cale malgré un écart moins important que sur les courbes enveloppes. L'article final détaillera la démarche suivie et analysera d'avantage les résultats obtenus.

Afin de compléter cette étude plusieurs axes peuvent être considérés en perspectives : utilisation de la commande instantanée de couple, l'effet de la mutuelle, influence de la saturation de la cale sur la commande et considération d'autres cartographies.

## 6. Références

- [1] H. HANNOUN, « Etude et mise en oeuvre de lois de commande de la machine à réluctance variable à double saillance », thèse Paris Sud 11, France, 2008.
- [2] X. DENG, Q. YUAN, J. LU, ET 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, p. 1-4.
- [3] S. P. RANDALL, « Noise reduction in reluctance machines », US6072260 A, brevet, 06-juin-2000.
- [4] S. AYARI, « Etude des vibrations des machines à réluctance variable: influence des caractéristiques géométriques et de l'excentricité rotorique », thèse Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2000.
- [5] M. N. ANWAR et 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, p. 99-106.
- [6] N. K. SHETH et K. R. RAJAGOPAL, « Optimum pole arcs for a switched reluctance motor for higher torque with reduced ripple », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 39, n° 5, p. 3214-3216, 2003.
- [7] J. W. LEE, H. S. KIM, B. I. KWON, et B. T. KIM, « New rotor shape design for minimum torque ripple of SRM using FEM », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 40, n° 2, p. 754-757, 2004.
- [8] Y. K. CHOI, H. S. YOON, et C. S. KOH, « Pole-shape optimization of a switched-reluctance motor for torque ripple reduction », *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 43, n° 4, p. 1797-1800, 2007.
- [9] J. HUR, G. H. KANG, J. Y. LEE, J. P. HONG, et 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.
- [10] Y. H. KIM, J. H. CHOI, S. I. JUNG, Y. D. CHUN, S. KIM, J. LEE, M. S. CHU, K. J. HONG, et D. H. CHOI, « Optimal design of switched reluctance motor using two-dimensional finite element method », *J. Appl. Phys.*, vol. 91, n° 10, p. 6967-6969, 2002.