

Retour haptique électromagnétique réglable pour des interfaces homme-machine

Javier RÍOS QUESADA, Shinara UTEGENOVA

Moving Magnet Technologies S.A.

RESUME -Un dispositif électromagnétique basé sur un aimant électro-permanent est développé pour être utilisé dans le cadre des interfaces homme-machine. L'aimant électro-permanent permet de régler le ressenti lors de l'utilisation de la commande.

Mots-clés— *Aimant électro-permanent – Dispositif haptique – Faible consommation – Sans contact – Sans bruit*

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des interfaces homme-machine (IHM) embarquées dans un véhicule, il est important qu'un retour haptique puisse informer le conducteur de la prise en compte de son action. Différentes technologies ont été proposées, avec des dispositifs passifs ou actifs.

Les dispositifs passifs présentent comme inconvénient de ne proposer qu'un seul retour haptique quelques soient les interactions, mais, elles ont l'avantage de ne pas consommer d'énergie.

Les dispositifs actifs utilisent des moteurs électriques [1] ou des fluides magnétorhéologiques [2] pour moduler la force ou le couple résistant de manière dynamique, permettant ainsi une grande variabilité des réponses, toutefois, ce sont des dispositifs complexes, qui doivent être alimentés en permanence, et qui nécessitent un contrôle dynamique continu.

MMT a développé un dispositif, basé sur les aimants électro-permanents, permettant de réunir plusieurs avantages :

- Variabilité des ressentis ;
- Consommation d'énergie limitée ;
- Absence de bruit.



Figure 1 - Exemples de boutons IHM actuellement en production dans l'industrie automobile dans le cadre de l'infodivertissement

2. AIMANT ÉLECTRO-PERMANENT

2.1. Structure

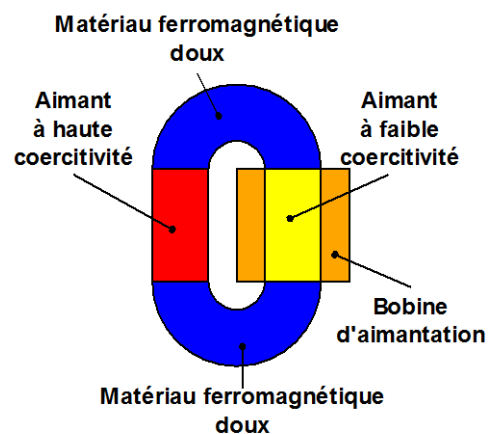


Figure 2 – Nomenclature

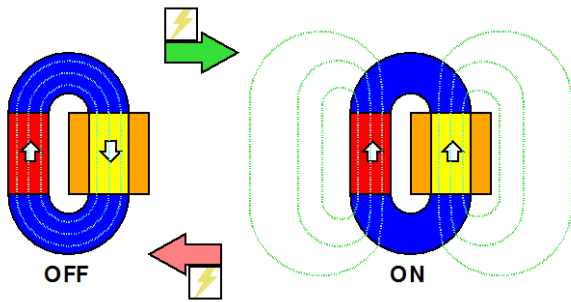


Figure 3 - Fonctionnement d'un AEP

Un aimant électro-permanent (AEP) est l'assemblage de 2 aimants, 2 pièces ferromagnétiques et une bobine de contrôle (Figure 2).

Le fonctionnement d'un AEP est décrit sur la Figure 3, ainsi, en fonction du sens des impulsions de courant dans la bobine on peut changer le sens d'aimantation d'un aimant et obtenir : soit un objet magnétiquement inerte, quand le flux magnétique se reboucle entre les 2 aimants (court-circuit) ; soit un aimant équivalent lorsque les flux créés par les 2 aimants s'opposent.

Notons que, sans l'apport d'énergie pour réaimanter l'aimant commandé, le comportement de l'ensemble ne changera pas.

2.2. Matériaux

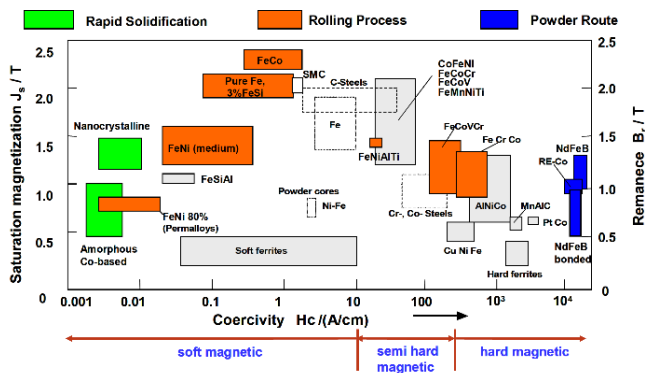


Figure 4 - Répartition des matériaux selon la valeur de leur champ coercitif – Document Vacuumschmelze [3]

Les matériaux que nous avons considérés et utilisés dans le cadre des AEP, sont des matériaux ferromagnétiques présentant des champs coercitifs différents (Figure 4) :

- Un matériau ferromagnétique dur avec une forte coercitivité et une rémanence élevée (ex : aimant NdFeB) ;
- Un matériau ferromagnétique dur ou semi-dur, présentant une coercitivité plus faible d'au moins un facteur 10 par rapport au précédent (ex : aimant AlNiCo) ;
- Un matériau ferromagnétique doux présentant une coercitivité très faible et une saturation élevée pour les pièces de liaison (ex : FeSi).

2.2.1. Aimant à faible coercitivité – Préliminaire

Une campagne de mesures a été menée sur un aimant AlNiCo cylindrique, de 4 mm de diamètre et 80 mm de long, pour tester la forme de l'impulsion adéquate et les possibilités d'aimantation avec le matériel présenté sur la Figure 6. Notons que la bobine d'aimantation ayant été calibrée préalablement, nous connaissons le champ magnétique externe appliqué en fonction du courant mesuré.

Nous avons choisi de travailler avec un aimant AlNiCo-5, Il s'agit d'aimant métalliques présentant une rémanence élevée (de l'ordre de 1,25 T) un champ coercitif relativement faible (~ 60 kA/m) comme on peut le voir sur la Figure 5.

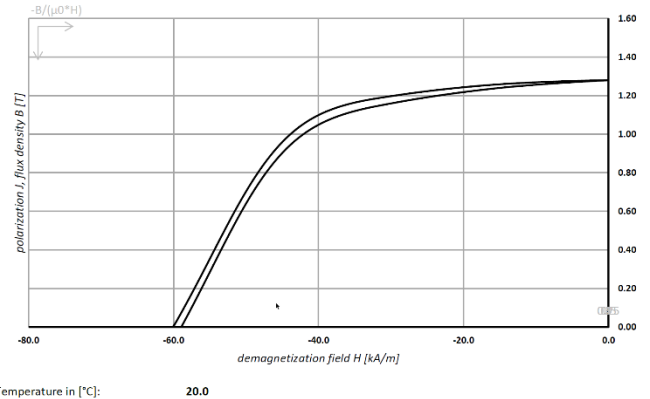


Figure 5 - Exemple de caractéristique magnétique d'un aimant AlNiCo, ici la nuance BMACA-40/5 [4]

Ce type d'aimant présente une résistivité plutôt faible ($0,45 \mu\Omega.m$) et une perméabilité relative de l'ordre de 2,5, il sera donc sujet aux courants de Foucault.

Comme indiqué sur la Figure 2, une bobine placée autour de l'aimant va nous permettre de l'aimanter dans un sens ou dans l'autre en fonction du sens du courant de l'impulsion qui est appliqué et dès lors qu'un champ magnétique d'au moins 100 kA/m pourra être atteint. Pour appliquer cette impulsion, nous avons besoin d'une électronique dont nous ne discuterons pas ici la structure, mais qui doit inclure des condensateurs pour stocker l'énergie nécessaire à l'aimantation et des interrupteurs permettant de choisir le sens et le moment de l'impulsion.

2.2.2. Aimant à faible coercitivité - Présentation

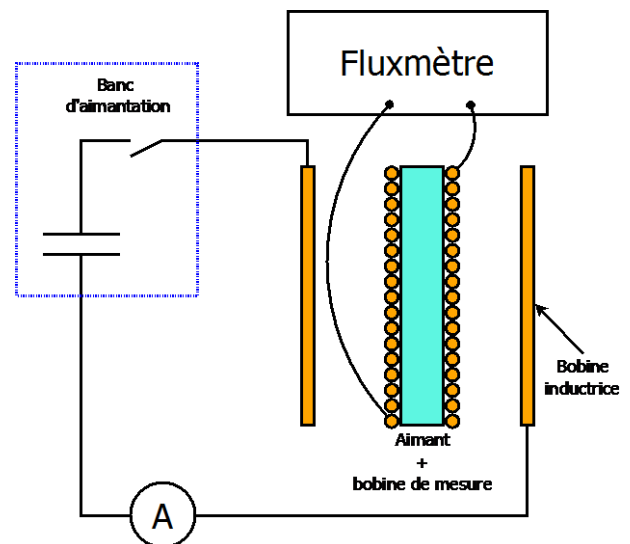


Figure 6 - Mesure du champ magnétique extérieur et du flux d'un aimant lors de l'aimantation

2.2.2.1 Forme de l'impulsion d'aimantation

Les mesures du flux de l'aimant une fois l'aimantation passée, nous montrent que la présence des courants de Foucault lors de l'aimantation empêche que l'aimantation soit directement liée au champ magnétique atteint dans la bobine. Ainsi, sur la Figure 7, nous pouvons voir que des impulsions brèves, de forme sinusoïdale ne réussissent pas à aimanter totalement l'aimant et pour des impulsions avec un gradient de flux élevé réussissent même à le désaimanter. Des impulsions plus longues avec un gradient plus faible lors de l'extinction de

l'impulsion (impulsion exponentielle), permettent pour leur part une aimantation optimale de l'aimant.

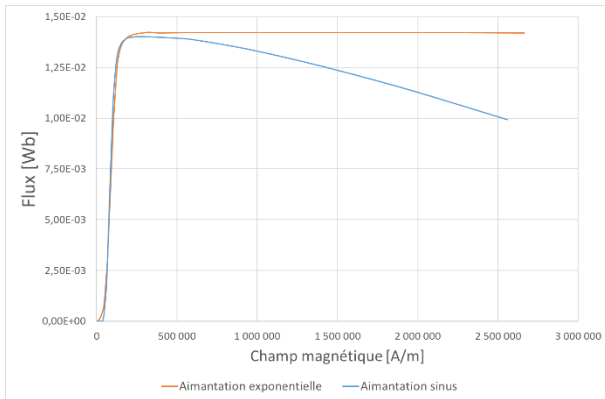


Figure 7 - Effet du mode d'aimantation sur le flux fourni par l'aimant à faible champ coercitif

Cette conclusion a un effet direct sur les interrupteurs qu'il faudra utiliser dans l'électronique de commande, il faudra qu'ils soient dimensionnés pour supporter une puissance instantanée élevée sur un temps relativement long.

2.2.2.2 Renversement du flux

Le but du changement de sens de l'aimantation de l'aimant est de renverser le sens du flux. Sur la Figure 8 nous pouvons observer le renversement du flux lors de l'application d'un champ magnétique d'aimantation opposé à l'aimantation initiale. De par la loi de Lenz, une variation de flux en fonction du temps implique une force contre-électromotrice aux bornes de la bobine d'aimantation.

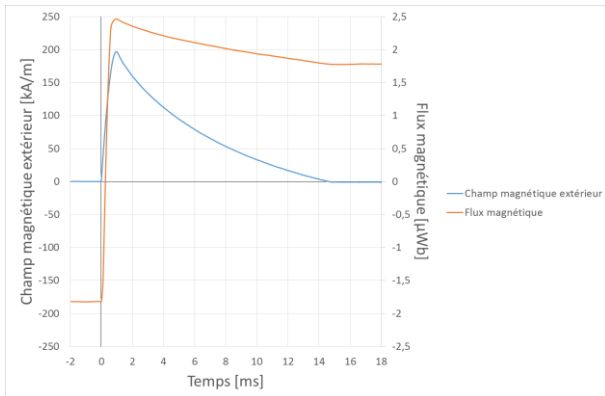


Figure 8 - Renversement du flux lors d'une aimantation

Dans le cadre d'une utilisation pour des dispositifs haptiques dans le domaine automobile, la tension d'alimentation de référence est de 12 V. Pour produire le champ magnétique nécessaire au changement d'aimantation, une bobine avec un nombre élevé de spires sera nécessaire, la force contre-électromotrice, proportionnelle au nombre de spires, ne sera plus négligeable vis-à-vis de la tension de l'impulsion d'aimantation et s'opposera au renversement de l'aimantation. De ce fait, la réserve d'énergie de la partie électronique doit être calculée en conséquence.

2.2.2.3 Aimantation partielle

Des tests d'aimantation partielle ont été faits (Figure 9) et montrent qu'en contrôlant le courant d'aimantation, on peut viser des inductions rémanentes sur l'aimant comprises entre 0 T et l'induction rémanente maximale, dans les deux sens d'aimantation et de manière stable du point de vue du dispositif.

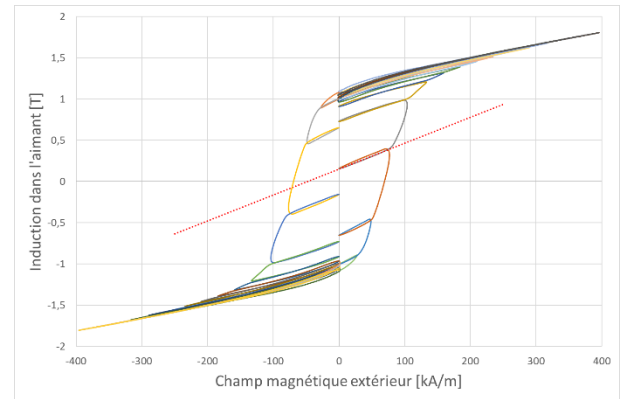


Figure 9 - Aimantations partielles d'un aimant à faible champ coercitif avec des impulsions d'amplitude croissante puis décroissante

Évidemment, pour pouvoir avoir ce comportement il faudra que l'électronique permette la modulation de l'énergie d'aimantation.

3. ÉTUDE DU DISPOSITIF HAPTIQUE

3.1. Structure magnétique

Le dispositif haptique que nous présentons est basé sur un aimant électro-permanent à pôles dentés, formant un stator et une couronne dentée en tant que rotor (Figure 10).

Cette structure permet deux fonctionnements principaux :

- Soit les deux aimants sont aimantés dans des sens opposés et le flux magnétique produit par les aimants se referme sur lui-même sans passer par la couronne et donc sans créer de couple ;
- Soit les aimants sont aimantés dans des sens identiques et le flux magnétique de l'ensemble traverse l'entrefer pour se refermer en passant par la couronne extérieure créant un couple et de ce fait le ressenti de crans.

Ce dispositif fait l'objet d'une demande de brevet.

Contrairement à ce qui se fait sur les machines électriques, nous cherchons ici à maximiser le couple sans courant avec la possibilité de le sculpter pour créer différents ressentis, comme ce qui est montré sur la Figure 11.

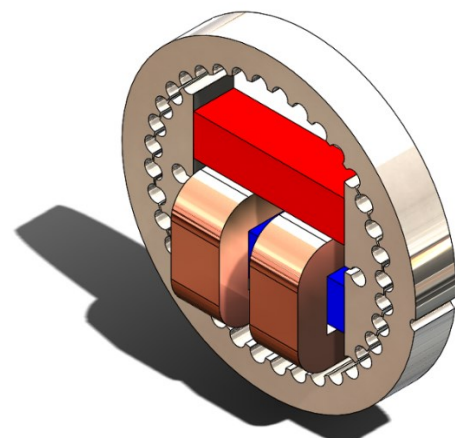


Figure 10 - Dispositif EPM 36 pas

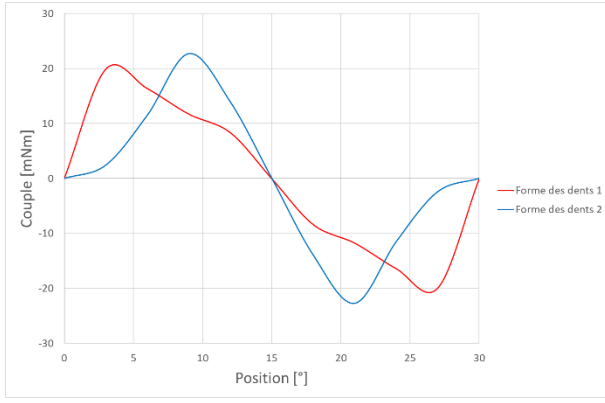


Figure 11 - Couple pour 2 dispositifs à 12 pas

3.2. Modélisation

MMT a développé plusieurs outils permettant la pré-étude et l'optimisation de ce type de structures pour pouvoir les adapter à différents cahiers des charges. Ces outils sont basés sur des réseaux de perméances.

Le couple d'un dispositif électromagnétique (Γ) peut se calculer en utilisant la variation de coénergie du système (W') en fonction du déplacement angulaire (θ) :

$$\Gamma(\theta) = \frac{d W'}{d\theta} \quad (1)$$

Si nous considérons un réseau de perméances réduit à un circuit équivalent comportant le flux (ϕ) généré par l'AEP et une réluctance globale ($\mathcal{R}$) du chemin de flux traversant l'entrefer global entre l'AEP et la couronne, nous obtenons

$$\Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \phi^2 \frac{d \mathcal{R}}{d\theta} \quad (2)$$

Notons toutefois que les outils de modélisation ont été développés pour calculer le couple du système lorsque celui-ci est activé. Ainsi, nous partons du principe que les dimensions des aimants et les sections des passages de flux sont adaptées de façon à pouvoir reboucler le flux avec le minimum de fuites lors de la désactivation de l'AEP, obtenant ainsi un couple nul.

De même, l'étude de l'aimantation dans un sens ou dans l'autre de l'aimant à faible coercitivité n'est pas abordée, sachant par ailleurs que les modèles par éléments finis que nous utilisons habituellement ne permettent pas la prise en compte de l'hystérésis ce qui rend la simulation de l'aimantation difficile.

3.2.1. Modèle de pré-étude

Dans un premier temps, nous avons développé un modèle 2D nous permettant de comparer le couple de différents dispositifs en fonction du nombre de pas et de l'encombrement disponible. Pour ce modèle, nous avons simplifié (2) et considéré la variation de flux entre la position de flux maximal et celle de flux minimal séparés d'un demi-pas angulaire ($\alpha/2$) :

$$\Gamma_m = \phi^2 \frac{\mathcal{R}_{max} - \mathcal{R}_{min}}{\alpha} \quad (3)$$

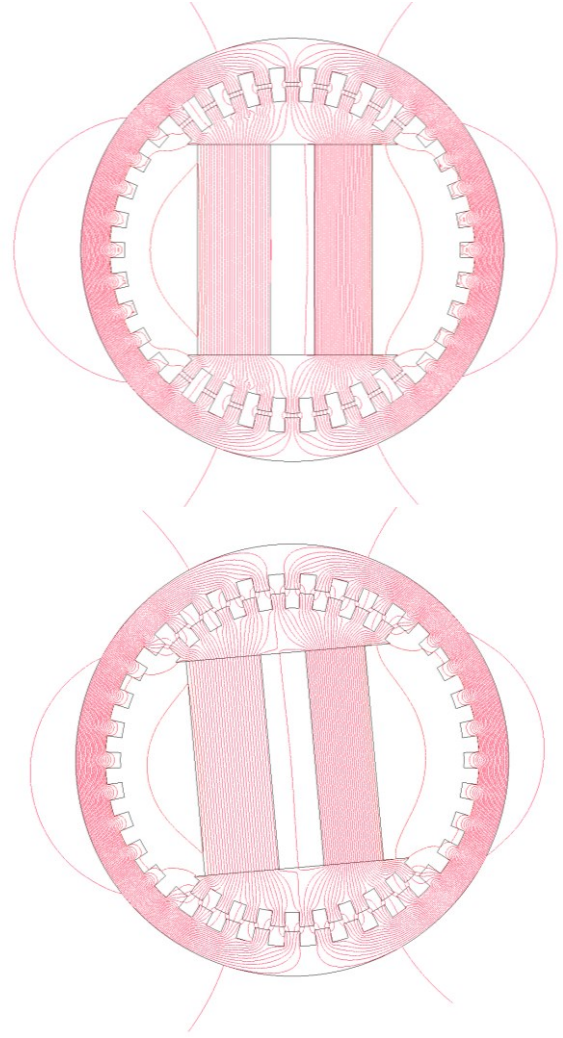


Figure 12 - Lignes de champ pour les positions flux maximal (haut) et flux minimal (bas)

Le fait de travailler avec un modèle 2D, implique que nous ne prenons pas en compte les fuites de flux 3D qui, selon les dimensions des dispositifs peuvent être importantes. Par ailleurs, un modèle trop simple du circuit magnétique masquera les fuites entre dents (Figure 12) et donnera un couple surévalué. Nous avons alors choisi d'inclure les perméances sur les flancs des dents dans le calcul, en considérant tout de même un trajet en arc de cercle, pour obtenir finalement les 2 circuits présentés dans la Figure 13.

Ce modèle nous permet d'effectuer des calculs rapidement pour déterminer si, en prenant en compte les contraintes principales du cahier des charges client, nous pouvons proposer un dispositif adapté. Ainsi, par exemple les résultats de la Figure 14 montrent que la structure proposée ne s'adaptera pas pour des cas à faible nombre de pas.

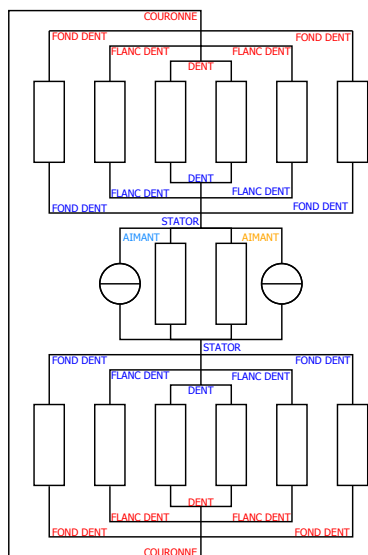


Figure 13 - Modèle de pré-étude pour la position flux maximal (haut) et flux minimal (bas)

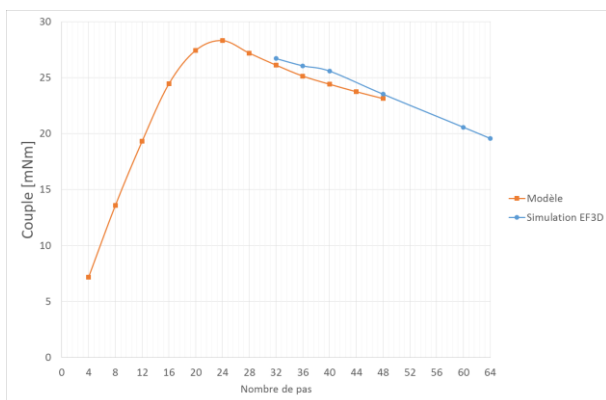


Figure 14 - Résultats de calcul avec le modèle de pré-étude

3.2.2. Modélisation par réseau de perméances

Un modèle 2D par réseau de perméances a été développé pour pouvoir calculer la forme de couple lors du déplacement de la couronne et, le cas échéant, pouvoir sculpter la forme des dents pour pouvoir adapter le couple obtenu à celui du cahier des charges d'un client. Comme nous ne nous intéressons qu'au comportement du dispositif en mode crantage, nous considérons

un aimant permanent simple entre les 2 pièces polaires de l'actionneur (Figure 15).

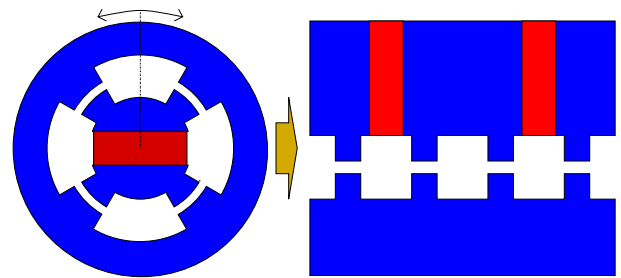


Figure 15 - Géométrie simplifiée pour le travail de la forme des dents

La modélisation se fait en discrétisant le dispositif avec des blocs élémentaires comportant une source de force magnétomotrice entourée de 2 à 4 perméances ou conditions aux limites (Figure 16).

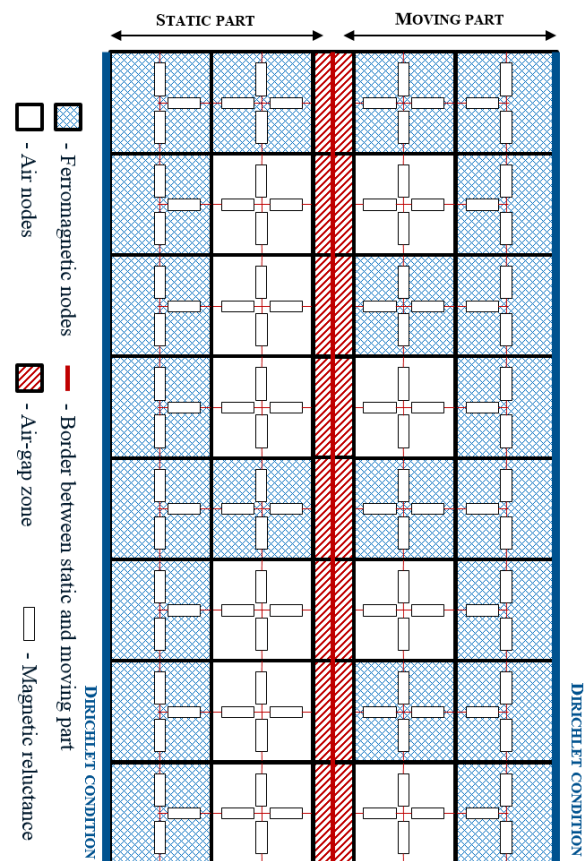


Figure 16 – Discrétisation et mise en place d'un réseau de perméances pour simuler le dispositif

Le mouvement est simulé par reconnexion des perméances de la zone stator et de la zone rotor avec les perméances de la zone entrefer, de ce fait, le nombre de points simulés par pas du dispositif est directement lié à la discrétisation utilisée.

Pour simplifier les calculs lors de la prise en compte des formes du rotor et du stator, il n'y a pas de prise en compte des perméances tangentielles ni dans les dents ni dans les encoches du rotor et du stator, et là aussi, la qualité de la forme des dents dépend du nombre de points pris en compte, ce qui revient à une discrétisation plus fine de l'ensemble du problème.

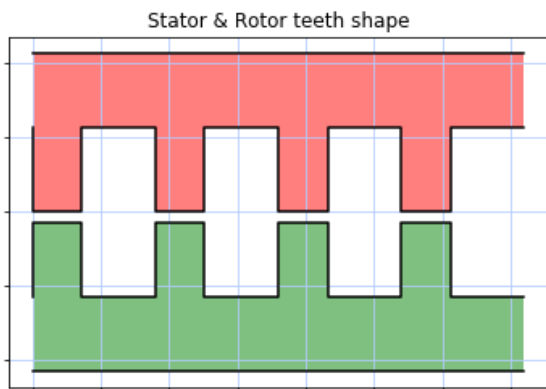


Figure 17 - Stator et couronne avec 4 dents de chaque côté

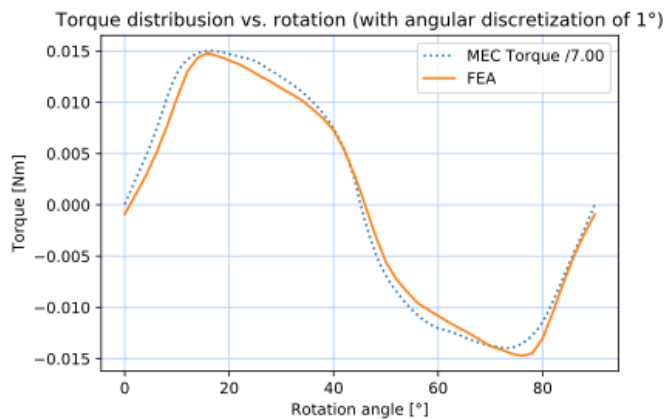


Figure 18 - Résultat obtenu et comparaison avec un modèle EF pour la géométrie de la Figure 17

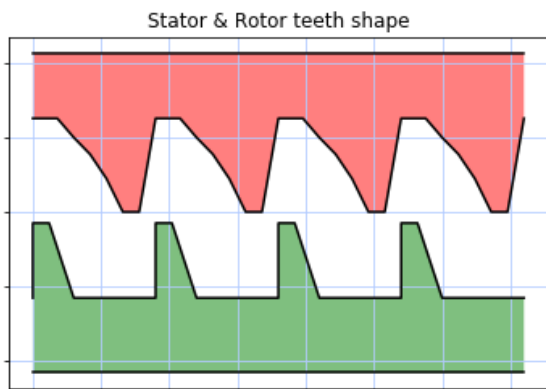


Figure 19 - Géométrie avec des dents sculptées

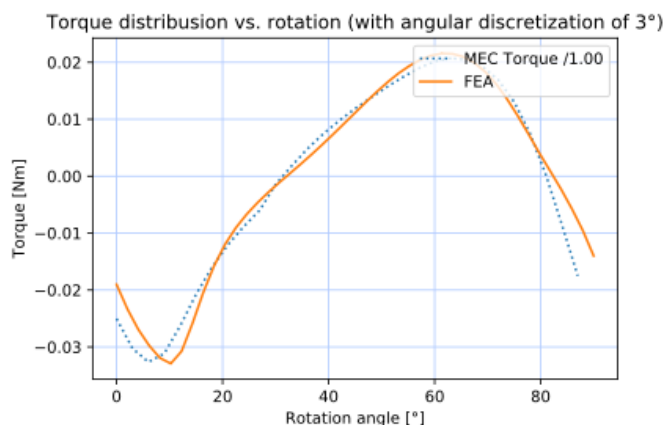


Figure 20 - Comparaison des résultats du modèle selon la géométrie présentée dans la Figure 19

Une fois le modèle discrétisé, nous utilisons (2) pour déterminer le couple développé par le dispositif en utilisant les caractéristiques des matériaux utilisés qui peuvent être modélisés soit comme des matériaux linéaires ou des matériaux avec une saturation magnétique.

Ce modèle a été programmé sous Python, autant pour sa discrétisation que pour sa résolution et donne des résultats comparables à ceux d'une simulation par EF 2D (Figure 17 et Figure 18).

La Figure 19 et la Figure 20 montrent le résultat obtenu par sculpture des dents statoriques et rotoriques.

Actuellement, un travail important est fait sur ce modèle pour permettre de prendre en compte les perméances tangentielles dans les dents et les encoches, améliorer le positionnement des forces magnétomotrices, utiliser une ligne de glissement pour disjoindre la discrétisation du rotor et du stator, prendre en compte les effets 3D, cela permettra de disposer d'un modèle plus rapide à mettre en œuvre, puisque la discrétisation pourra être plus légère. Nous travaillons aussi sur la mise en place d'un algorithme d'inversion du problème, c'est-à-dire que l'utilisateur fournirait la forme de couple souhaitée et il obtiendrait la forme à donner aux dents.

4. CONSTRUCTION ET MESURE D'UN PROTOTYPE

Dans le but de montrer la viabilité du concept et de pouvoir intégrer le dispositif dans le tableau de commande d'une automobile, par exemple, nous avons prototypé un certain nombre de dispositifs avec des caractéristiques différentes (comportement, nombre de pas...).

Nous avons choisi des dimensions (Figure 21) compatibles avec celles de systèmes de commande actuellement utilisés dans le monde automobile, notamment pour les commandes d'infodivertissement ou de climatisation (Figure 1).

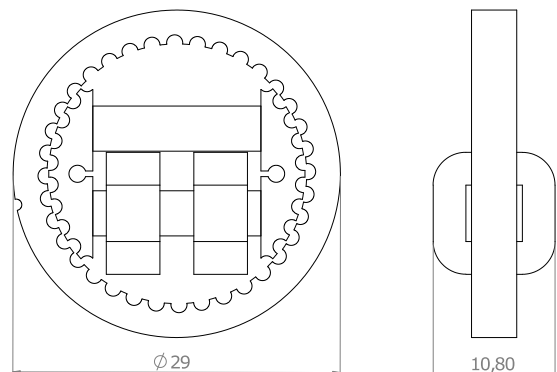


Figure 21 - Dimensions choisies pour les démonstrateurs

La base du dispositif est une pièce en plastique permettant de placer et tenir les aimants, placer et tenir les 2 pièces polaires, guider l'axe rotorique et bobiner les bobines.

Le rotor pour sa part est composé d'un cylindre plastique intégrant la couronne rotorique, un axe et l'aimant d'un capteur de position.

Nous avons effectué différentes mesures sur un dispositif à 36 pas. Ainsi, le couple ressenti lorsqu'on fait tourner d'un pas le dispositif est montré sur la Figure 24, lorsque l'AEP est magnétisé et lorsqu'il ne l'est pas.

Nous constatons que le couple obtenu réellement est légèrement plus faible que celui prévu par la simulation 2D : 21 mNm au lieu de 31 mNm, perte due aux effets 3D. Par ailleurs, lors de la démagnétisation, nous mesurons un couple résiduel d'une amplitude proche de 1 mNm dû à un déséquilibre entre le flux produit par l'aimant NdFeB et celui produit par l'aimant AlNiCo.



Figure 22 – Pièces ferromagnétique d'un dispositif de 12 pas

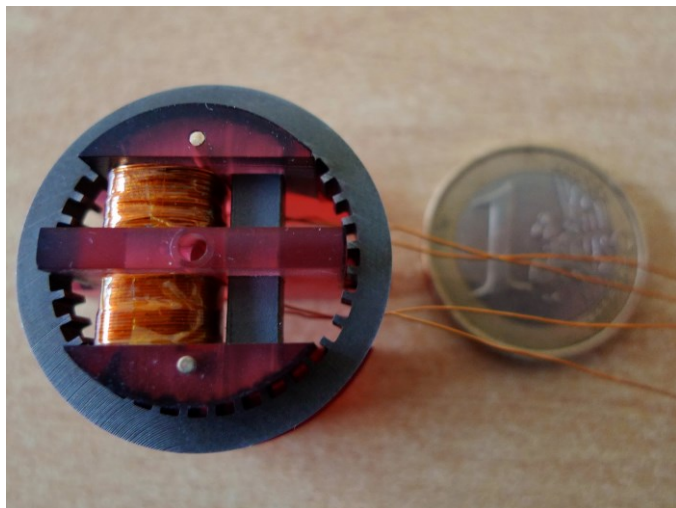


Figure 23 – Exemple de dispositif de 36 pas

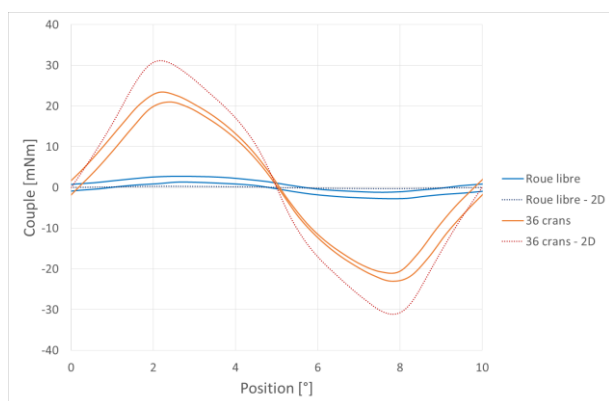


Figure 24 - Mesure d'un prototype à 36 pas/tour

Du point de vue de l'utilisateur, le ressenti est bien celui d'un cliquet dans le premier cas et d'une roue libre dans le deuxième.

Nous constatons, comme prévu, qu'il faut plusieurs impulsions de courant pour obtenir le maximum du couple dans un sens et pour réduire le couple au minimum dans l'autre.

La Figure 25 et la Figure 26 montrent respectivement les impulsions de magnétisation de l'AEP et celles de démagnétisation. Nous reconnaissons la forme d'une décharge de condensateurs, ici chargés à 27 V et nous remarquons l'effet de la force contre-électromotrice due à l'inversion du flux lors de la première impulsion.

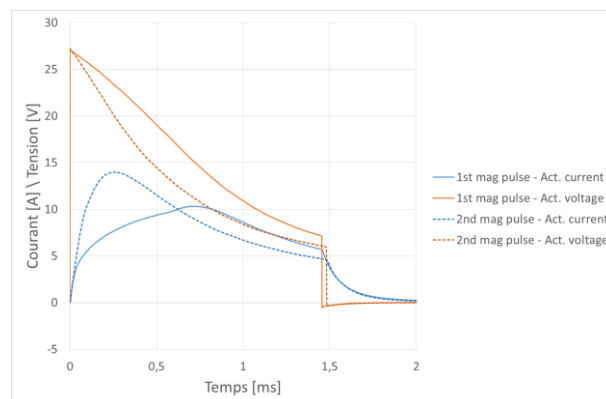


Figure 25 - Magnétisation de l'aimant électro-permanent

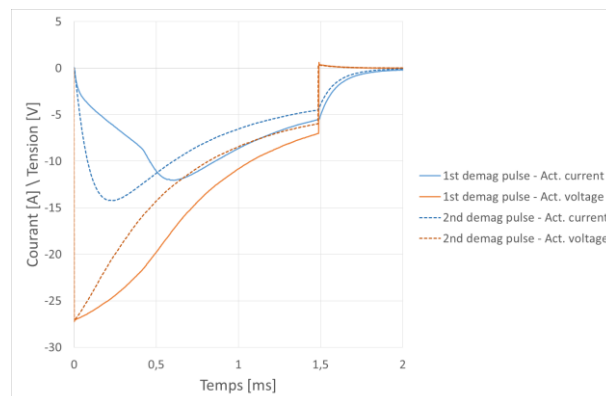


Figure 26 - Démagnétisation de l'aimant électro-permanent

Évidemment, la présence de l'aimant NdFeB implique qu'il est plus facile de démagnétiser l'AEP (l'aimant AlNiCo présente un flux qui reboucle celui de l'aimant NdFeB) que de le magnétiser (où le flux de l'aimant NdFeB s'oppose au champ d'aimantation).

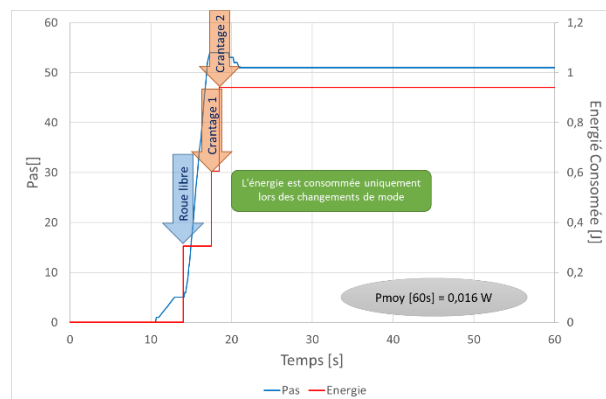


Figure 27 - Énergie consommée lors d'un déplacement type

Remarquons qu'il s'agit bien d'atteindre des champs magnétiques relativement élevés, d'où des courants pouvant atteindre 15 A, mais sur des temps courts, de l'ordre de quelques

centaines de microsecondes. La puissance instantanée atteint quelques centaines de Watts, mais, si on considère une puissance moyenne sur des temps d'utilisations correspondant à un mouvement de réglage opérée par la main de l'utilisateur (Figure 27), la puissance moyenne consommée est faible comparée à celle d'un dispositif où l'on doit maintenir l'alimentation en continu.

5. CONCLUSION

Cette structure basée sur un aimant électro-permanent est adaptée à la conception de dispositifs à retour haptique. En effet, le couple étant obtenu par des interactions électromagnétiques on évite les contacts mécaniques et de ce fait le bruit et l'usure des pièces. De plus, le passage d'un mode haptique à l'autre se fait sans pièce en mouvement améliorant le confort d'utilisation.

La forme du couple est fixée lors de la fabrication, contrairement aux solutions basées sur un moteur ou des fluides MR, mais ces EPM ne consomment d'énergie que lors des changements de mode.

Les outils mis en place pour s'assurer de la viabilité de ces dispositifs face à un cahier des charges client s'avèrent être efficaces et rapides. Toutefois, le modèle par réseau de perméances sera amélioré pour être plus proche de la réalité en prenant en compte les effets des fuites 3D, les chemins de flux tangentiels dans les encoches et les dents et surtout la possibilité d'inverser le modèle pour obtenir une structure optimisée à partir d'un cahier des charges incluant un niveau de couple et une forme de couple particulière.

6. REFERENCES

- [1] M. Badescu, C. Wampler, C. Mavroidis, *Rotary haptic knob for vehicular instrument controls*, in 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 342-343 February, 2002.
- [2] M.G. Karabulut, M.I.C. Dede, *Design and Experimental Validation of an MR-Fluid Based Brake for Use in Haptics*, in ACTUATOR 2018, pp. 279-283, Bremen, Germany, June 25-27, 2018
- [3] M. Weickhmann, *Nd-Fe-B Magnets, Properties and Applications*, Vacuumschmelze GmbH&Co, Hanau, Germany, revised March 13th 2009
- [4] *BMaca-40/5*, BOMATEC Version January 1st 2019