

Estimation de la vitesse d'une MSAP par observateur et Filtre de Kalman pour une interface haptique

Ziad JABBOUR¹, Sandrine MOREAU², Alain RIWAN¹, Jonathan VAN RHIJN¹, Gérard CHAMPENOIS²

¹CEA, LIST, Service de Robotique Interactive,
18 route du Panorama, BP6, FONTENAY AUX ROSES, F- 92265 France.
Ziad.jabbour@cea.fr, Alain.riwan@cea.fr, Johnathan.vanrhijn@cea.fr

²LAI – Université de Poitiers,
40 avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers cedex, France.
Sandrine.moreau@univ-poitiers.fr, Gerard.champenois@univ-poitiers.fr

Résumé— Une interface haptique à retour d'effort est un périphérique informatique qui permet à l'utilisateur d'interagir avec un logiciel ou avec un modèle numérique par l'intermédiaire du sens du toucher. Il s'agit d'une structure mécanique articulée, dotée de moteurs et de capteurs de position, ainsi que d'une électronique embarquée. La commande de ces systèmes à basse vitesse devient instable à cause de la vitesse faible imposée par l'utilisateur. Cet article présente l'implantation sur DSP d'un observateur d'état (déterministe) et d'un filtre de Kalman (stochastique) pour estimer la vitesse d'un Moteur Synchrones à Aimant Permanent (MSAP) utilisé dans le cadre d'une interface haptique à un seul degré de liberté. Les deux méthodes proposées offrent une bonne estimation de la vitesse et leur influence sur la raideur du système est analysée en tenant compte de la variation du moment d'inertie du système.

Mots-clés— Interface haptique ; Moteur synchrone à aimant permanent ; raideur ; estimation de la vitesse ; Filtre de Kalman ; Observateur d'état.

I. INTRODUCTION

Une interface haptique à retour d'effort est un périphérique informatique qui permet à l'utilisateur d'interagir avec un logiciel ou avec un modèle numérique par l'intermédiaire du sens du toucher. L'opérateur ressent une sensation de toucher et de mouvement grâce à cette technologie qui optimise la communication homme/machine et intensifie l'immersion de l'homme dans un monde virtuel. Ces systèmes sont de plus en plus demandés dans les applications telles que la robotique mobile, la télé-opération en milieux extrêmes (nucléaire, spatial) et la formation médicale (dentaire, chirurgie) [1][2]. Il s'agit d'une structure mécanique articulée, dotée de moteurs et de capteurs de position, ainsi que d'une électronique embarquée. L'utilisateur tient l'extrémité de la structure dans la main, et peut la déplacer dans l'espace réel comme dans l'espace virtuel de l'écran de l'ordinateur. Lorsque sa main virtuelle entre en contact avec un objet numérique, une valeur d'effort est envoyée aux moteurs qui simulent un contact réel [3].

Le banc d'essai est une interface haptique à un seul degré de liberté (figure 1) qui fait partie d'un robot à cinq degrés de liberté, Surgicobot (figure 2), développé par le CEA et Haption pour assister le geste du chirurgien et éviter des déplacements dans des zones interdites. Il est piloté par une machine synchrone à aimant permanent (MSAP). La MSAP

offre une faible inertie, une meilleure dissipation de la chaleur et un volume réduit en comparaison avec une machine à courant continu de même puissance et à couple nominal équivalent. Pour piloter une MSAP, les courants du stator ainsi que la position du rotor doivent être connus. Les courants sont mesurés à travers des résistances placées en série. La position est mesurée à l'aide d'un codeur incrémental monté sur l'axe du moteur. Pour améliorer les performances du système et éviter des oscillations en régime permanent, une boucle de vitesse est ajoutée entre la boucle de courant et la boucle de position. L'information vitesse est donc nécessaire pour l'application et cette dernière n'étant pas mesurée, elle est estimée à partir des données disponibles comme les courants et la position. L'ensemble des boucles de régulations de la MSAP et les algorithmes d'estimation de la vitesse ont alors été implantés sur un processeur de signal numérique de chez Texas Instruments (DSP TMS320F2812FPGA) [4].

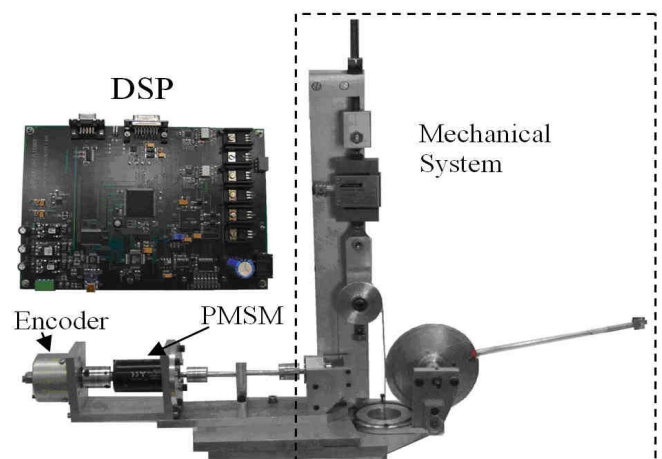


Figure 1 : Banc d'essai à un seul degré de liberté

Pour résoudre le problème d'estimation de vitesse, sachant que celle-ci est relativement faible en raison de l'application visée, deux méthodes sont proposées : un observateur d'état déterministe d'un part et un Filtre de Kalman stochastique d'autre part.

L'observateur utilise les courants mesurés et la position de la machine pour estimer la vitesse. Et les gains de l'observateur dépendent directement des paramètres mécaniques de la MSAP. Quant au Filtre de Kalman, il a été implanté à partir d'un autre modèle faisant intervenir les variations de position pour estimer la vitesse et ses gains ont été réglés expérimentalement en fonction de la dynamique d'accélération et des bruits de mesure présents sur la mesure de position. L'influence de la stratégie d'estimation et du modèle utilisé pour estimer la vitesse sur la raideur de l'interface haptique est ensuite étudiée. La raideur se définit comme le rapport des efforts statiques appliqués à l'interface sur le déplacement résultant, quand le système simule une butée ou un contact rigide [5].

Les performances des deux méthodes et des deux modèles d'estimation de vitesse proposés sont testés expérimentalement sur un banc d'essai équipé d'une MSAP Maxon-EC40 et sont ensuite comparées entre elles.



Figure 2 : Surgicobot

II. MODELE ET COMMANDE DE LA MSAP

Le modèle électrique de la MSAP à pôles lisses est représenté dans l'équation (1), où R_s est la résistance du bobinage statorique, L est l'inductance du bobinage statorique, p le nombre de paire de pôles, ω la vitesse mécanique, v_d, v_q, i_d et i_q respectivement les tensions et courants directs et en quadrature. C_{em} est le couple électromagnétique et Φ_f est le flux permanent.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q - \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \Phi_f \cdot i_q$$

Le modèle mécanique de la MSAP est décrit dans l'équation (2), où J_m est le moment d'inertie, f_{vm} le coefficient de frottement visqueux, θ la position mécanique du rotor, C_s le couple de frottement sec et C_r est le couple extérieur.

$$J_m \times \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_{vm} \times \omega - C_s \quad (2)$$

Le modèle utilisé par la suite pour estimer la vitesse de la MSAP à l'aide de l'observateur repose sur la représentation d'état simplifiée (3), où τ_d représente un couple de perturbation prenant en compte les incertitudes de modèles, le couple de frottement non linéaire, les variations de paramètres et le couple de charge externe [5].

Le modèle mécanique de la MSAP se met alors sous la forme $\dot{X} = A X + B u$ suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\tau}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -f_{vm}/J_m & -1/J_m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ \tau_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J_m \\ 0 \end{bmatrix} C_{em}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega \\ \tau_d \end{bmatrix} X = C \cdot X \quad (3)$$

Afin de contrôler la MSAP, différentes boucles de régulations numériques imbriquées les unes dans les autres sont mises en œuvre. Premièrement, un contrôleur de type proportionnel-intégral est utilisé pour contrôler les courants de la machine à une période Te . La régulation du courant i_q revient à asservir le couple de la machine à la valeur nécessaire pour l'application à retour d'effort. La vitesse est quant à elle contrôlée à une période $Tv = 3 \times Te$ pour réduire les ondulations du système. Finalement, la position est contrôlée à une période $Tp = 2 \times Tv$. Les gains des contrôleurs sont calculés de façon à assurer la meilleure rigidité et transparence possibles du système. La transparence permet de qualifier la qualité du déplacement libre dans l'environnement virtuel.

L'ensemble des contrôleurs de courant, vitesse et position ainsi que les algorithmes d'estimation de la vitesse sont embarqués dans le processeur de signal numérique (figure 3).

III. OBSERVATEUR D'ETAT

Un observateur d'état est une extension d'un modèle représenté sous forme de représentation d'état. Lorsque l'état d'un système n'est pas mesurable, on construit un observateur qui permet de reconstruire l'état à partir d'un modèle dynamique du système et de certaines grandeurs mesurées.

Le modèle d'observateur d'état déterministe utilisé pour estimer la vitesse de la MSAP est représenté sous la forme [5] :

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\omega} \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -f_{vm}/J_m & -1/J_m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J_m \\ 0 \end{bmatrix} C_{em} \quad (4)$$

$$+ G \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\omega} \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \theta_m$$

où $G = [g_1 \quad g_2 \quad g_3]^T$.

$\hat{\theta}$, $\hat{\omega}$, $\hat{\tau}_d$ et g_i sont respectivement, la position du rotor estimée, la vitesse du rotor estimée, le couple de perturbation estimé et les gains de l'observateur.

L'équation caractéristique de (4) est donnée dans (5) et les pôles de l'observateur sont placés en utilisant la méthode de placement direct des pôles.

$$\det[sI - (A - GC)] = 0$$

$$s^3 + \frac{g_1 J_m + f_{vm}}{J_m} s^2 + \frac{g_2 J_m + g_1 f_{vm}}{J_m} s - \frac{g_3}{J_m} = 0 \quad (5)$$

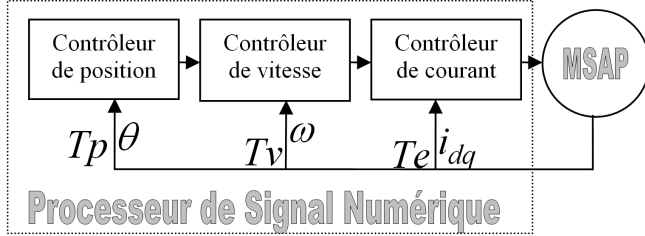


Figure 3 : Boucles de régulations imbriquées

De l'équation (5), g_1, g_2 et g_3 sont calculés de la façon suivante :

$$\begin{aligned} g_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) - \frac{f_{vm}}{J_m} \\ g_2 &= (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3) + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \frac{f_{vm}}{J_m} + \left(\frac{f_{vm}}{J_m} \right)^2 \\ g_3 &= \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 J_m \end{aligned} \quad (6)$$

IV. FILTRE DE KALMAN

Le filtre de Kalman [6] est un estimateur optimal dans le sens des moindres carrés pour l'estimation des états de systèmes dynamiques, qui tient compte des bruits d'état et de mesure.

Pour une application directe et simple de cet algorithme à l'estimation de la vitesse du MSAP, un modèle en temps discret du système doit être déterminé comme suit :

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_{k-1} + w_{k-1} \quad (7)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (8)$$

Les variables w_{k-1} et v_k représentent respectivement les bruits d'état et les bruits de mesure. Les bruits sont supposés être blancs gaussiens et indépendants de l'état du système x . Ils sont caractérisés respectivement par leur covariance Q_k et R_k .

L'algorithme du filtre de Kalman discret se décompose en deux étapes :

- Une étape de prédiction :

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_{k-1} \quad (9)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (10)$$

- Une étape d'innovation :

$$\hat{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (11)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (12)$$

La matrice de gain du filtre K_k :

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (13)$$

La mise à jour d'état :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \hat{y}_k \quad (14)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

La phase de prédiction utilise l'estimation de l'état à l'étape précédente afin de déterminer une estimation de l'état courant.

Dans la phase de mise à jour, l'information sur la mesure à l'état courant est utilisée pour obtenir une estimation d'état plus précise à l'instant courant.

Dans notre cas, le modèle suivant a été utilisé pour implanter le Filtre de Kalman :

$x = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T$, $z = \theta$, $u = 0$ et les matrices du système F_k ,

H_k , Q_k et R_k sont représentées par :

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & T_e & \frac{T_e^2}{2} \\ 0 & 1 & T_e \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}, \quad H_k = [1 \quad 0 \quad 0], \quad Q_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{acc}^2 \end{bmatrix},$$

$$R_k = \sigma_{pos}^2 \quad (15)$$

Ce modèle, différent du modèle utilisé par l'observateur déterministe présenté à la section III, est plus facilement implantable sur un D.S.P. à virgule fixe et permet d'évaluer l'importance du choix du modèle sur la raideur de l'interface haptique et sur la robustesse de l'estimation de vitesse lorsque l'inertie mécanique varie.

La variance σ_{acc}^2 prend en considération la dynamique d'accélération, tandis que σ_{pos}^2 représente la variance du bruit de mesure de la position.

V. RESULTATS EXPERIMENTAUX

A. Caractéristiques du banc d'essai

Pour piloter la MSAP, l'algorithme de contrôle présenté dans la deuxième section a été embarqué dans le processeur de signal numérique. La position est mesurée à l'aide d'un codeur incrémental de résolution 5000 pts/tr, tandis que les courants sont mesurés à travers des résistances placées en série sur les phases du moteur. Les paramètres de la MSAP (Maxon-EC40) sont donnés en annexe.

Pour bien calibrer les gains de l'observateur, les paramètres mécaniques et électriques ont été identifiés en utilisant un algorithme d'identification de type moindres carrés (table I). De plus, il a été montré dans [5] que pour $T_e = 25\mu s$, la meilleure réponse est obtenue lorsque les pôles de l'observateur sont placés à -200rad/s .

Les paramètres du filtre de Kalman ont été calibrés expérimentalement: $\alpha = 0$, $\sigma_{acc} = 5 \times 10^5$ et $\sigma_{pos} = 2 \times 10^{-6}$.

TABLE I
CARACTERISTIQUES DU MOTEUR ET DU BANC D'ESSAI

Maxon EC40			Paramètres mécaniques du banc d'essai	
R (Ω)	L (mH)	Φ_f (mWb)	J_m (g. cm ²)	f_{vm} (mN.m / rad/s)
1.17	0.34	22.7	328	0.118

La mise en œuvre de tels filtres sur un processeur numérique à virgule fixe conduit à la dégradation de la résolution des calculs et à des problèmes de débordement numérique. Enfin, les problèmes numériques ont été résolus en utilisant une méthode de calcul à virgule flottante «virtuelle» [7].

Les paramètres mécaniques du banc d'essai estimés (table 1) sont introduits dans l'équation 6. Alors, l'observateur est synthétisé avec l'inertie réelle et le coefficient de frottement visqueux de l'ensemble de la structure mécanique.

Il est connu que la main du chirurgien peut se déplacer rapidement (10 tr/s) loin des régions délicates et avec d'avantage de précaution, à vitesse plus lente (0.1 tr/s), près des zones délicates. Les deux algorithmes d'estimation de la vitesse présentés précédemment ont été testés sur le banc d'essai pour une gamme de vitesse allant de 0.1 à 10 tr/s.

Les figures 4, 5 et 6 comparent la vitesse estimée par l'observateur et la vitesse estimée par le filtre de Kalman à 0.1, 1 et 10 tr/s respectivement. On constate que la vitesse estimée par l'observateur avec le modèle (3) est plus lisse et moins perturbée par rapport à celle estimée par le filtre de Kalman et le modèle (15). La dégradation des performances du Filtre de Kalman est liée à l'architecture du processeur numérique (microprocesseur à virgule fixe) et à la structure du modèle utilisé. Les erreurs relatives entre la consigne de vitesse et la vitesse estimée sont données dans le tableau II.

TABLE II
ERREUR RELATIVE ENTRE LA CONSIGNE ET LA VITESSE ESTIMÉE

Vitesse (tr/s)	0.1	1	10
Erreur de l'observateur	2%	0.4%	0.12%
Erreur du filtre de Kalman	20%	1.5%	0.2%

B. Variation du moment d'inertie du système

Le moment d'inertie dans un système à un seul degré de liberté est normalement constant ou varie très légèrement. Tandis que, dans un système à plusieurs degrés de liberté, comme le Surgicobot, l'inertie du système peut facilement quadrupler, notamment sur le premier axe qui subit les modifications de configuration des autres axes de la structure. Pour étudier l'impact de ces variations d'inertie sur les performances des estimateurs proposés, plusieurs tests ont été mis en œuvre.

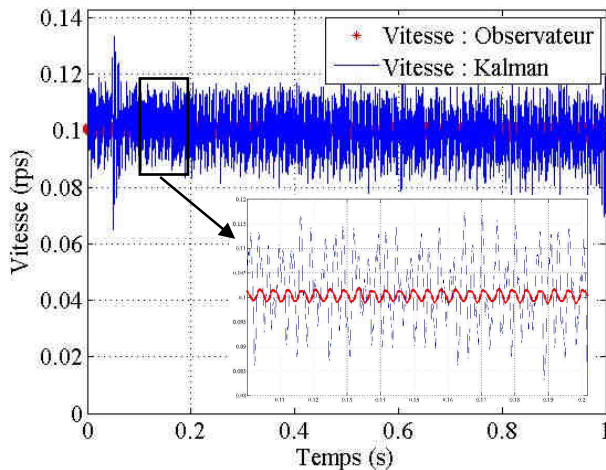


Figure 4 : Vitesse estimée par l'observateur et le Filtre de Kalman à 0.1 tr/s.

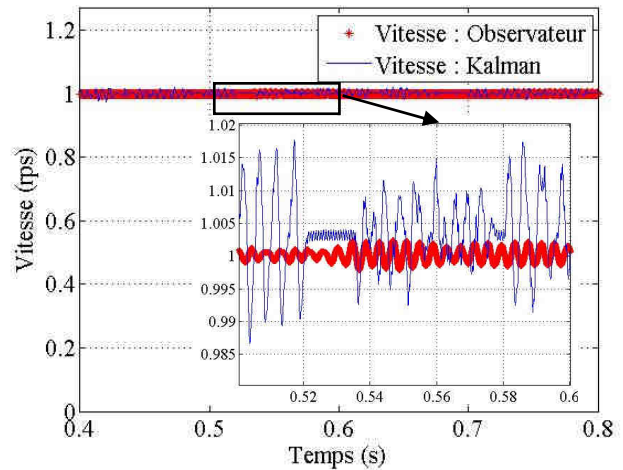


Figure 5 : Vitesse estimée par l'observateur et le Filtre de Kalman à 1 tr/s.

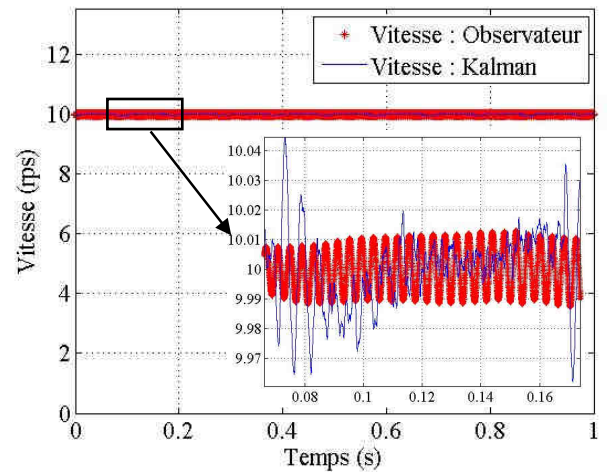


Figure 6 : Vitesse estimée par l'observateur et le Filtre de Kalman à 10 tr/s.

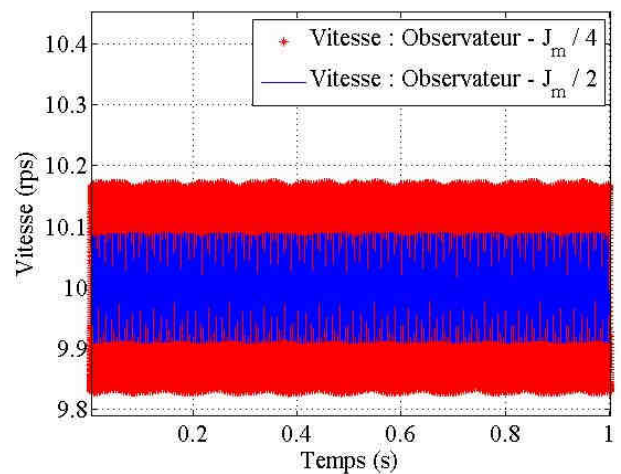


Figure 7 : Vitesse estimée avec l'observateur avec $J_m = J_m / 2$ et $J_m / 4$ à 10 tr/s.

Pour changer le moment d'inertie du système à un degré de liberté, des poids ont été ajoutés à l'extrémité de la poignée. Du fait de la gravité, ces poids induisent des déséquilibres

statiques qui pourront être compensés. La méthode pour tester la robustesse de l'estimation de la vitesse vis-à-vis des variations du moment d'inertie consiste à recalculer les gains du système à partir d'une valeur du moment d'inertie J'_m différente de la valeur réelle J_m de ce dernier.

Les figure 7 et 8 montrent des résultats expérimentaux pour la vitesse estimée avec l'observateur à 1 et 10 tr/s avec des gains mal réglés à $J'_m = J_m/2$ et $J'_m = J_m/4$. On peut constater que l'erreur relative est dix fois plus grande par rapport à l'erreur 'idéale' mesurée précédemment (table II).

La figure 9 compare la vitesse estimée avec le Filtre de Kalman et l'observateur à $J'_m = J_m \times 2$ par rapport à la vitesse réelle.

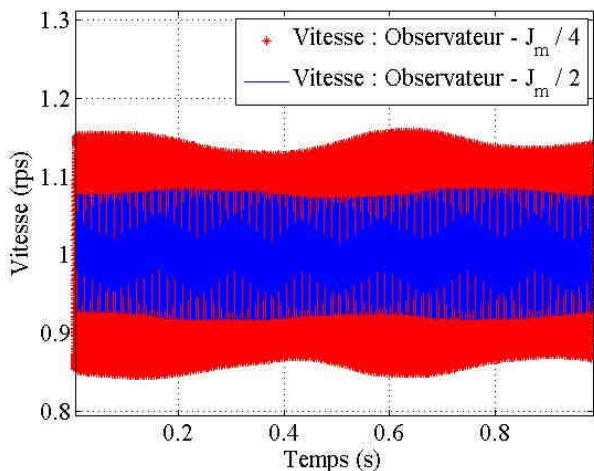


Figure 8 : Vitesse estimée avec l'observateur avec $J'_m = J_m/2$ et $J'_m/4$ à 1 tr/s.

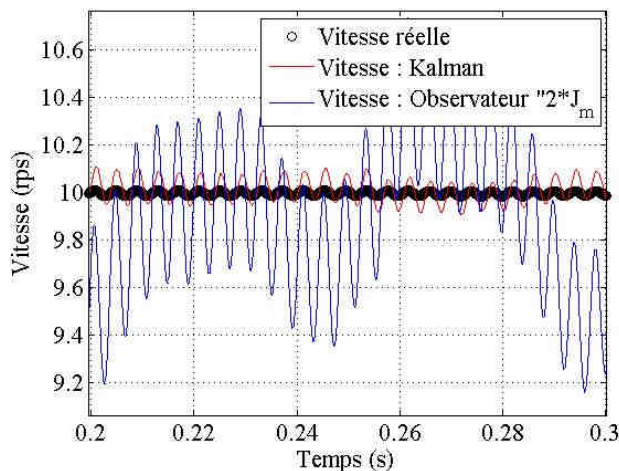


Figure 9 : Vitesse estimée avec l'observateur avec ' $2J_m$ ', vitesse estimée avec le Filtre de Kalman et vitesse réelle.

Après les différents tests effectués, on constate que le Filtre de Kalman n'est pas sensible aux variations de l'inertie. Cela est dû au fait que l'inertie n'intervient pas dans le modèle de calcul de la vitesse avec le Filtre de Kalman. Ce dernier présente donc une très bonne robustesse vis-à-vis des variations du moment d'inertie comparativement à celle de l'observateur reposant sur un modèle mécanique de la MSAP dépendant directement de l'inertie.

C. Amélioration de la raideur

Dans les interfaces haptiques, la MSAP est utilisée pour contrôler la position du robot. Dans ce cas, les gains des contrôleurs doivent être calibrés pour assurer la stabilité du système pour toutes les positions et trajectoires possibles. En utilisant l'observateur dans un robot à plusieurs degrés de liberté pour estimer la vitesse, les gains doivent être calibrés pour tenir compte des pires cas possibles.

La figure 10 montre une comparaison des raideurs obtenues en utilisant l'observateur calibré respectivement à $J'_m = J_m/2$, $J'_m = J_m/4$ et $J'_m = J_m \times 2$. Quand le moment d'inertie est multiplié par deux, la raideur du système utilisant l'observateur passe de 35 Nm/rad à 3.75 Nm/rad.

La figure 11 présente la comparaison des raideurs optimales obtenues par l'observateur et le Filtre de Kalman lorsqu'ils sont bien réglés et que la valeur exacte du moment d'inertie est utilisée. On constate alors que l'observateur est capable de garantir une raideur de 35 Nm/rad avec une calibration optimale, tandis que le Filtre de Kalman est limité à 24.7 Nm/rad.

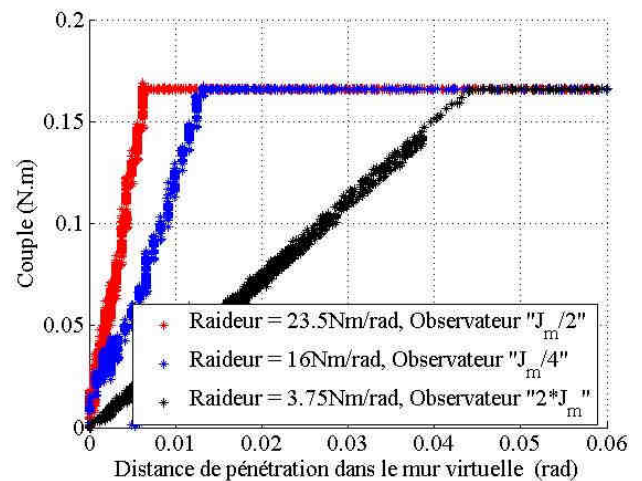


Figure 10 : Raideur du système en utilisant l'observateur.

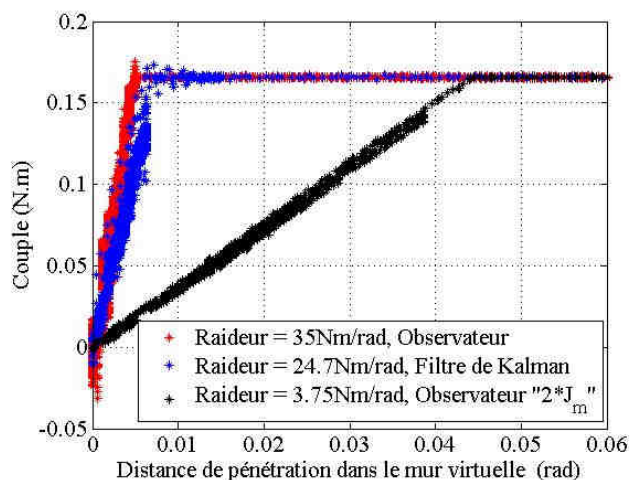


Figure 11 : Raideurs optimales du système.

VI. CONCLUSION

Cette publication a présenté une comparaison entre deux méthodes et deux modèles d'estimation de vitesse utilisées dans le cadre d'une application à retour d'effort : un observateur de vitesse d'une part développé à partir d'un modèle mécanique de la MSAP et le filtre de Kalman fondé sur un modèle d'intégration de l'accélération d'autre part.

L'effet de la variation du moment d'inertie sur la qualité de la vitesse estimée et sur la raideur du système a été analysé.

En conclusion on retient que l'observateur est plus performant que le filtre de Kalman à condition de bien identifier le moment d'inertie du système. Par contre le filtre de Kalman est plus robuste et il s'adapte bien aux variations des paramètres mécaniques.

L'intégration d'un modèle dynamique du robot dans le contrôleur pourra permettre, dans des travaux futurs, de tenir compte des variations d'inertie dans l'observateur de vitesse pour les applications à plusieurs degrés de liberté.

En outre, l'utilisation d'une carte électronique basée sur un processeur numérique à virgule flottante améliorera considérablement la résolution et la vitesse de calcul pour les deux algorithmes.

ANNEXE

PARAMETRES DU MOTEUR MAXON EC40

Puissance	120 W
Couple nominal	120mNm
Courant nominal	3.2 A
Vitesse nominale	300 tr/s
Moment d'inertie	85 gcm ²
Resistance statorique	0.65 Ω
Inductance statorique	0.34 mH
Nombre de paires de pôles	1

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire CEA List et le LAII de l'Université de Poitiers et grâce au soutien financier de la Région Poitou-Charentes.

REFERENCES

- [1] Colgate J.E., Grafing P.E., Stanley M.C., Schenkel G., "Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces", in Proc. IEEE-VRAIS, pp. 202-208, 1993.
- [2] Millman P.A., Stanley M., Colgate J.E., "Design of a high performance haptic interface to virtual environments", IEEE-VRAIS, pp 216-222, September, 1993.
- [3] Khatounian F., Moreau S., Louis J.P., Monmasson E., "Modeling and Simulation of a Hybrid Dynamic System Used in Haptic Interfaces", in 8th Electrimacs Conference, Hammamet, Tunisia, Proc., CD-ROM, ISBN 2-921145-51-0, 2005.
- [4] DSP Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor, Texas Instruments, 1997.
- [5] Jabbour Z., Moreau S., Riwan, A., Khatounian F., Champenois G., "Speed Estimation Improvement Using Full Order State Observer for a Haptic Interface" IEEE ICIT, Melbourne, Australia, 10-13 February 2009.
- [6] Hilairat M., Berthelot E., "Application du filtre Kalman à double niveau à l'estimation de la vitesse mécanique d'une machine synchrone, Congrès Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), Bordeaux, France, 2006.
- [7] IQmath Library, Texas Instruments, June 2002.