

# Compte rendu de la validation d'un observateur à grand gain interconnecté pour la MAS sans capteur mécanique sur la plate-forme d'essai de l'IRCCyN\*

Malek GHANES, Alain GLUMINEAU et Robert BOISLIVEAU

Le 17 mars 2004

*IRCCyN: Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597. Ecole Centrale de Nantes, BP 92101,1 Rue de la Noe, 44312 Nantes Cedex 3. e-mail: Malek.Ghanes@irccyn.ec-nantes.fr.*

## 1 Introduction

Dans le cadre de ma thèse intitulée "Observateurs et commandes non linéaires robustes pour la machine asynchrone sans capteurs mécaniques" et dirigée par Alain Glumineau (professeur des universités à l'ECN), deux benchmarks "Observateur sans capteurs" et "Commande sans capteurs" sont définis [5], [3]. Ces deux benchmarks ont été définis en collaboration avec le professeur Luc Loron de l'IREENA. Ils permettent respectivement de tester les observateurs et les commandes non linéaires robustes de la machine asynchrone sans capteurs mécaniques sur des trajectoires difficiles liées aux problèmes d'observabilité de cet actionneur à très basse vitesse. L'objectif de ce compte rendu est de montrer la validation expérimentale d'un observateur interconnecté pour la machine asynchrone sans capteurs mécaniques sur le benchmark observateur qui a été implanté sur la plate-forme d'essais de l'IRCCyN [7]. Dans un premier temps, ce compte-rendu présente le nouveau benchmark "Observateur sans capteurs" ainsi qu'un bref descriptif de la plate forme d'essai. La deuxième partie de ce compte rendu est consacrée à la présentation de l'observateur à grand gain interconnecté et des résultats expérimentaux de l'observateur obtenus sur le benchmark.

## 2 Benchmark Observateur sans capteur mécanique

Enoncé dans [1], [6], le problème de l'observabilité de la machine asynchrone a été caractérisée par des conditions suffisantes pour les cas observable et inobservable. Dans le cas inobservable, les conditions suffisantes sont telles que la pulsation d'excitation statorique est nulle (correspondant au fait d'avoir les composantes du flux constantes), et que la vitesse de la machine est constante. Pour proposer un benchmark permettant de tester les observateurs sur et autour de la zone inobservable, des trajectoires de références sont définies (Fig. 2). Les valeurs initiales de la vitesse et de la pulsation statorique sont prises de telle manière que la machine soit dans des conditions observables. Ensuite, la pulsation statorique tend vers zéro (les composantes de flux deviennent constantes (Fig. 3)) tandis que la vitesse de la machine reste constante, réalisant ainsi des zones inobservables entre 4 et 5 secondes et entre 6 et 7 secondes. Entre 5 et 6 secondes, la machine fonctionne avec une accélération constante dans le but de vérifier la convergence des observateurs lorsque la machine est faiblement observable. A la fin de la trajectoire, la machine asynchrone est contrôlée en dehors de la zone inobservable. En pratique, la difficulté principale réside dans le contrôle simultané de

---

\*Ce travail s'inscrit dans le cadre des activités du groupe inter GDR "Commandes des Entraînements Electriques", <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/CE2/>

la vitesse et de la pulsation statorique tel que la pulsation de glissement  $\omega g = \omega s - p\Omega$  ne dépasse pas une valeur limite  $\omega g = \frac{R_r}{L_r} M_{sr} \frac{I_q}{\psi_d}$ , qui correspond à la valeur maximale du courant statorique admissible. Pour respecter cette condition, il est nécessaire de contrôler la machine par une autre machine (de charge) qui permet d'imposer la trajectoire de la vitesse. En même temps la pulsation d'alimentation appliquée au stator suit la pulsation statorique de référence (Figure 1.b). Par ailleurs, des tests de robustesse par rapport à la variation des résistances et des inductances ont été définis dans le cadre de ce benchmark.

Ce benchmark est implanté sur la plate-forme d'essai de l'IRCCyN. Cette plate-forme est composée d'une machine asynchrone, d'une machine synchrone, d'un onduleur, d'un variateur industriel, d'un système de commande temps réel dSPACE DS1103 et d'une interface qui permet d'effectuer les mesures de position, de vitesse mécanique, des courants, des tensions et du couple de charge entre la machine testée et la machine de charge. Cette plate forme est aussi composée d'un logiciel MATLAB-Simulink pour développer, simuler un algorithme de commande ou d'observateur et l'expérimenter sur la carte de commande temps réel Dspace. Les résultats expérimentaux (mesures et variables estimées) seront observés par ControlDesk.

La trajectoire de référence de la pulsation statorique du benchmark observateur est contrôlée par une loi U/f classique via l'onduleur. Cette loi U/f est indépendante des mesures de la machine et des variables estimées. En même temps, la trajectoire de référence de la vitesse mécanique de la machine asynchrone est imposée par la machine synchrone (machine de charge) via le variateur industriel utilisant la mesure de la vitesse.

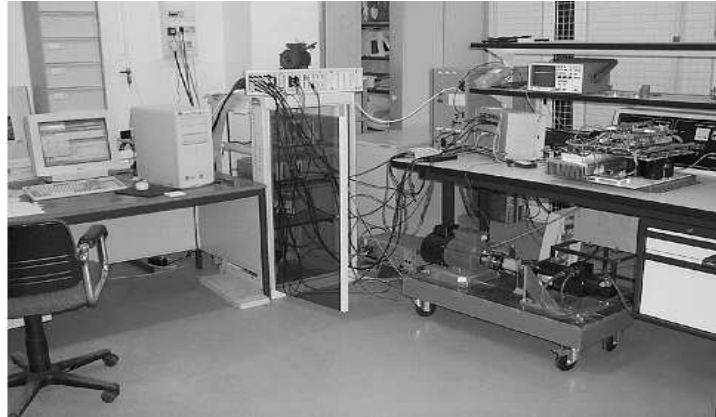


Figure 1: Plate forme d'essai de IRCCyN.

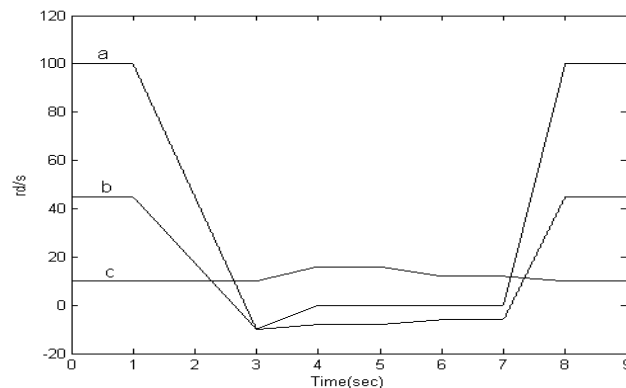


Figure 2: Trajectoires du Benchmark Observateur: a) pulsation statorique de référence (rd/s), b) vitesse de référence (rd/s), c) pulsation de glissement de référence en fonction du temps (s).

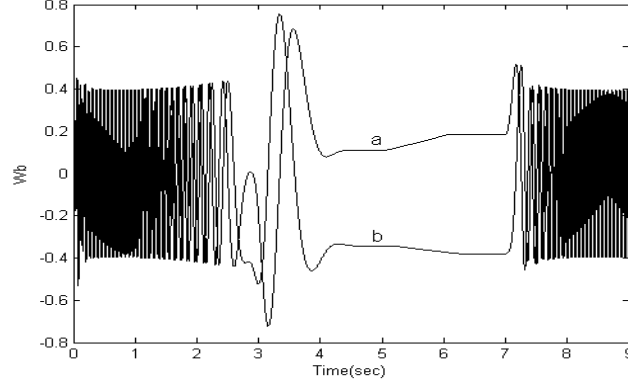


Figure 3: Composantes du flux rotorique: a)  $\Phi_{r\alpha}$ , b)  $\Phi_{r\beta}$ (Wb) en fonction du temps (s).

### 3 Synthèse de l'observateur à grand gain interconnecté

#### 3.1 Modèle de la MAS

Le modèle de la machine asynchrone présenté ici et celui qui est utilisé par la suite pour concevoir l'observateur à grand gain interconnecté.

Les équations du modèle de la machine asynchrone peuvent être écrites en utilisant les transformations de Concordia et de Park [2]. Les équations dynamiques obtenues sont exprimées dans le repère fixe diphasé ( $\alpha$ - $\beta$ ). En appliquant cette transformation, le modèle de la machine peut être décrit par :

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_{r\alpha} \\ \dot{\phi}_{r\beta} \\ \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\Omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a\phi_{r\alpha} - p\Omega\phi_{r\beta} + aM_{sr}i_{s\alpha} \\ -a\phi_{r\beta} + p\Omega\phi_{r\alpha} + aM_{sr}i_{s\beta} \\ b(a\phi_{r\alpha} + p\Omega\phi_{r\beta}) - \gamma i_{s\alpha} \\ b(a\phi_{r\beta} - p\Omega\phi_{r\alpha}) - \gamma i_{s\beta} \\ m(\phi_{r\alpha}i_{s\beta} - \phi_{r\beta}i_{s\alpha}) - c\Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ T_l \end{pmatrix} \quad (1)$$

où  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \phi_{r\alpha}, \phi_{r\beta}, u_{s\alpha}, u_{s\beta}, \Omega, T_l$  représentent les courants statoriques, les flux rotoriques, les tensions statoriques, la vitesse mécanique et le couple de charge. Les paramètres  $a, b, c, \gamma, \sigma, m$  et  $m_1$  sont définis par:

$$a = (R_r/L_r), \quad b = (M_{sr}/\sigma L_s L_r), \quad c = (f_v/J), \quad \gamma = \left( \frac{L_r^2 R_s + M_{sr}^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} \right), \quad \sigma = (1 - (M_{sr}/L_s L_r)), \quad m = (pM_{sr}/JL_r), \quad m_1 = (1/\sigma L_s).$$

$R_s$  et  $R_r$  sont les résistances statoriques et rotoriques.  $L_s$  et  $L_r$  sont les inductances statoriques et rotoriques,  $M_{sr}$  est la mutuelle inductance entre le stator et rotor.  $p$  est le nombre de paire de pole.  $J$  est l'inertie du système (machine+charge) et  $f_v$  est le coefficient de frottement visqueux. Les tensions de commande sont les tensions statoriques; le couple de charge est vu comme une perturbation. Seuls les courants statoriques et tensions statoriques sont mesurables.

### 3.2 Observateur à grand gain interconnecté

Le modèle de la machine (1) peut être réécrit en deux sous-systèmes interconnectés suivants :

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= A_1(v, X_2)X_1 + g_1(v, X_1, X_2) \\ y_1 &= C_1X_1\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\dot{X}_2 &= A_2X_2 + g_2(v, X_1, X_2) \\ y_2 &= C_2X_2\end{aligned}\quad (3)$$

où  $v$  est considérée comme étant une entrée connue, une sortie mesurable ou un signal externe,

$$\begin{aligned}A_1(v, X_2) &= \begin{pmatrix} 0 & bp\phi_{r\beta} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ A_2 &= \begin{pmatrix} -\gamma & 0 & ab \\ 0 & -a & 0 \\ -ab & 0 & -a \end{pmatrix}, \\ g_1(v, X_1, X_2) &= \begin{pmatrix} -\gamma i_{s\beta} + ab\phi_{r\alpha} + m_1 u_{s\alpha} \\ m(\phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \phi_{r\beta} i_{s\alpha}) - c\Omega \\ 0 \end{pmatrix}, \\ g_2(v, X_2, X_1) &= \begin{pmatrix} -bp\Omega\phi_{r\alpha} + m_1 u_{s\beta} \\ -p\Omega\phi_{r\beta} + aM_{sr}i_{s\alpha} \\ p\Omega\phi_{r\alpha} + a(M_{sr} + b)i_{s\beta} \end{pmatrix},\end{aligned}$$

et  $X_1 = \text{col}(x_{11}, x_{12}, x_{13})$  avec  $x_{11} = i_{s\alpha}$ ,  $x_{12} = \Omega$ ,  $x_{13} = T_l$ ,  $X_2 = \text{col}(x_{21}, x_{22}, x_{23})$  avec  $x_{21} = i_{s\beta}$ ,  $x_{22} = \phi_{r\alpha}$ ,  $v = x_{23} = \phi_{r\beta}$ ,  $C_1 = C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ .

L'objectif recherché est la conception d'un observateur pour le sous-système (2), qui est basé sur l'approche interconnectée (voir [4]), et un estimateur pour le sous-système (3).

En supposant les hypothèses suivantes :

- 1- Les variables  $u_{s\alpha}$ ,  $\phi_{r\alpha}$  and  $\phi_{r\beta}$  sont considérées comme des entrées connues du sous-système (2)
- 2- Les erreurs entre  $\hat{\phi}_{r\alpha}$ ,  $\hat{\phi}_{r\beta}$  et leur valeur réelles sont supposées petites si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision.
- 3-  $v$  est bornée.
- 4-  $A_1(v, Z_2)$  est globalement Lipschitz par rapport à  $Z_2$  et uniformément par rapport à  $v$ .
- 5-  $g_1$  est globalement Lipschitz par rapport à  $Z_2$  et uniformément par rapport à  $v$ .
- 6-  $g_2$  est globalement Lipschitz par rapport à  $Z_1$  et uniformément par rapport à  $v$  et  $Z_2$ .

sont vérifiées alors le sous-système (4) est un observateur pour le sous-système (2):

$$\begin{aligned}\dot{Z}_1 &= A_1(v, Z_2)Z_1 + g_1(v, Z_1, Z_2) - S^{-1}C^T(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{S} &= -\theta S - A_1^T(v, Z_2)S - SA_1(v, Z_2) + C^TC\end{aligned}\quad (4)$$

où  $\|S\|$  est supposée bornée pour  $\theta$  assez large, et  $Z_1 = \text{col}(z_{11}, z_{12}, z_{13})$  où  $z_{11} = \hat{i}_{s\alpha}$ ,  $z_{12} = \hat{\Omega}$ ,  $z_{13} = \hat{T}_l$ ,  $Z_2 = \text{col}(z_{21}, z_{22}, z_{23})$  et  $z_{21} = \hat{i}_{s\beta}$ ,  $z_{22} = \hat{\phi}_{r\alpha}$ ,  $v = z_{23} = \hat{\phi}_{r\beta}$ ,  $C = C_1$  et  $S^{-1}C^T$  est le gain de l'observateur.

L'estimateur du sous-système (3) est donné par les équations suivantes:

$$\dot{Z}_2 = A_2Z_2 + g_2(v, Z_2, Z_1)$$

De plus amples détails sur la construction de l'observateur et sa preuve de convergence sont donnés dans [4].

## 4 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de l'observateur obtenus sur le benchmark observateur sont présentés ci-dessous. Le schéma simulink utilisé à la plate forme d'essai pour expérimenter l'observateur est donné par la figure suivante:

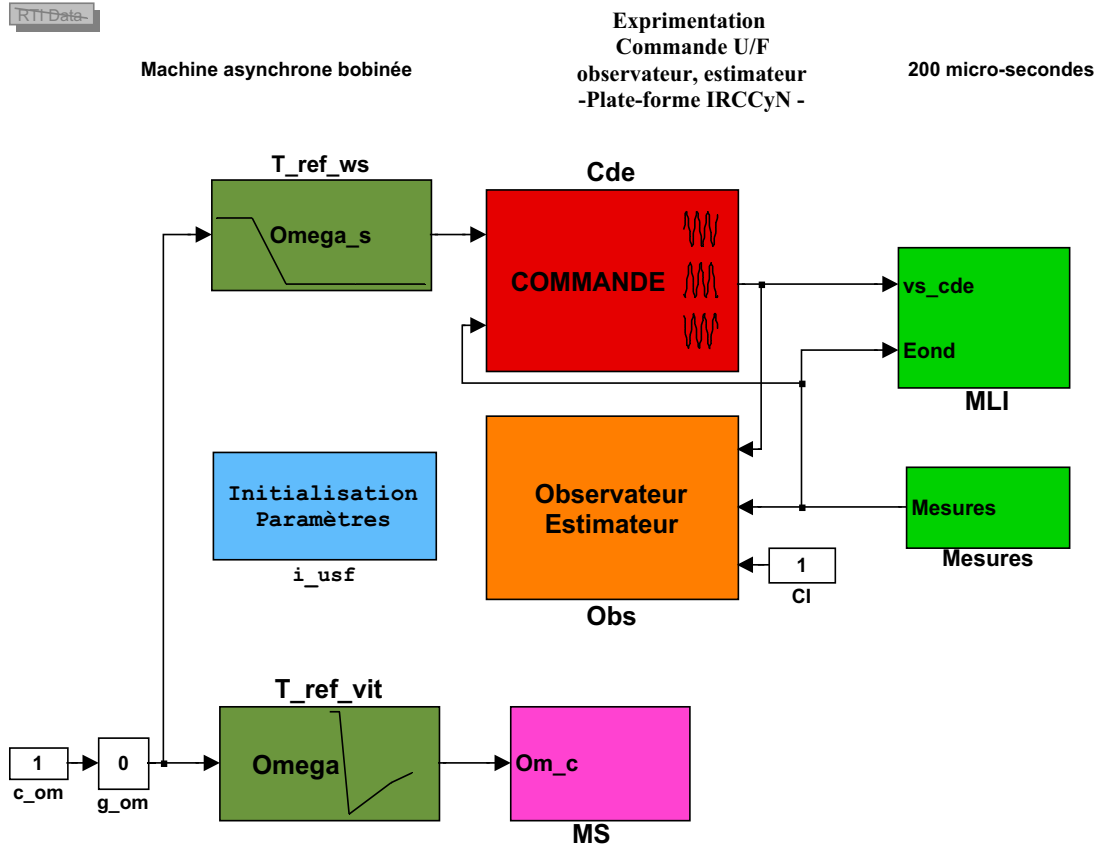


Figure 4: Schéma simulink utilisé à la plate forme de l'IRCCyN.

Les blocs "T\_ref\_ws" et "T\_ref\_vit" représentent respectivement les références de pulsation statorique et de vitesse du Benchmark observateur sans capteur. Le bloc "g\_om" est un gain variable de 0 à 1 permettant un démarrage progressif de l'expérimentation. Le bloc "MS" représente l'ensemble "variateur + machine synchrone (de charge)" permettant d'imposer la trajectoire de référence de vitesse de la MAS. Le bloc "Cde" qui est une commande scalaire "U/f" classique est le bloc qui sert à calculer la commande en tension  $vs\_cde$  ( $V_{abc}$ ). Cette commande  $vs\_cde$  va commander les interrupteurs de l'onduleur MLI représenté par le bloc "MLI" pour générer les trois tensions de commandes. Ces tensions de commandes sont appliquées au stator de la machine asynchrone dans le but de lui imposer la trajectoire de référence de la pulsation statorique. La tension  $E_{ond}$  est la tension du bus continu de l'onduleur. Le bloc "Mesures" représente tous les capteurs placés autour de la machine pour mesurer les grandeurs: tension, courant, vitesse, couple de charge, tension continue de l'onduleur  $E_{ond}$ . Le bloc "Obs" est le bloc de l'observateur à grand gain interconnectée à l'estimateur qui utilise uniquement les tensions statoriques  $vs\_cde$  et les courants statoriques provenant du bloc "mesures". Le bloc "CI" permet de valider (0) ou non (1) l'observateur. L'initialisation de tous les paramètres de la machine asynchrone est faite par le bloc "i\_usf".

La machine asynchrone à rotor bobiné utilisée a les caractéristiques suivantes : [7]  
 Puissance nominale : 1.5kW;

Vitesse nominale : 1430 tr/m;  
 Nombre de paires de pole : 2;  
 Tension 220 V (couplage triangle);  
 Intensité nominale : 7.5 A.

Les paramètres identifiés "nominaux" de la machine asynchrone utilisés sont :

$R_s = 1.633\Omega$ ;  $R_r = 0.93\Omega$ ;  $L_s = 0.142H$ ;  $L_r = 0.076H$ ;  $M_{sr} = 0.099H$ ;  $J = 0.0111/rad/s^2$ ;  $f_v = 0.0018Nm/rad/s$ . Le paramètre  $\theta$  est choisi comme suit:  $\theta = 45$  pour satisfaire les conditions de convergence.

#### 4.1 Essai avec les paramètres "nominaux"

Les figures 5 et 6 montrent les courbes de la vitesse et du couple de charge estimées dans le cas "nominal". **Remarque 1.** Nous considérons ici que les paramètres nominaux sont ceux que nous avons identifiés, que nous distinguerons des paramètres théoriques. Contrairement à la simulation, les paramètres expérimentaux dits "nominaux" ne correspondent pas exactement avec les paramètres réels de la machine. Les conditions expérimentales sont légèrement différentes des conditions d'identification et de plus l'identification a une certaine incertitude dans ses résultats.

Néanmoins La vitesse estimée (Figure 5) est globalement bien reconstruite dans les conditions observables. Par contre lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables, la vitesse estimée devient instable (Figure 5). Ce comportement est du aux gains de l'observateur qui deviennent grands et par conséquent la partie "correction de l'erreur de mesure" qui est fonction des gains de l'observateur devient importante et insignifiante lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables. la conclusion est la même pour le couple de charge estimé (Figure 6). Pour éviter ce comportement, la solution que l'on propose est d'adapter les gains de l'observateur à la propriété de l'observabilité de la machine, ce qui nous donne l'essai suivant.

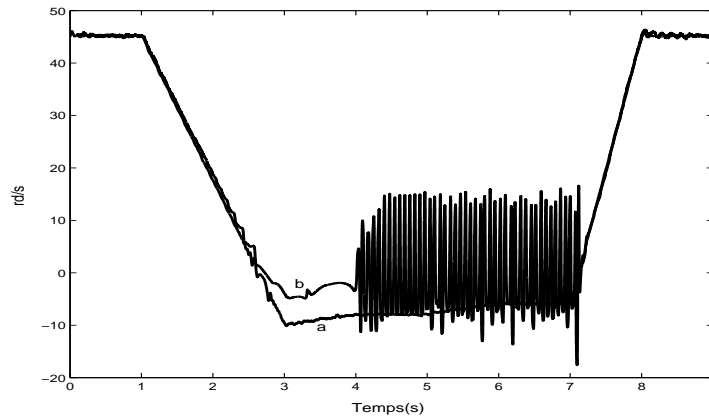


Figure 5: a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

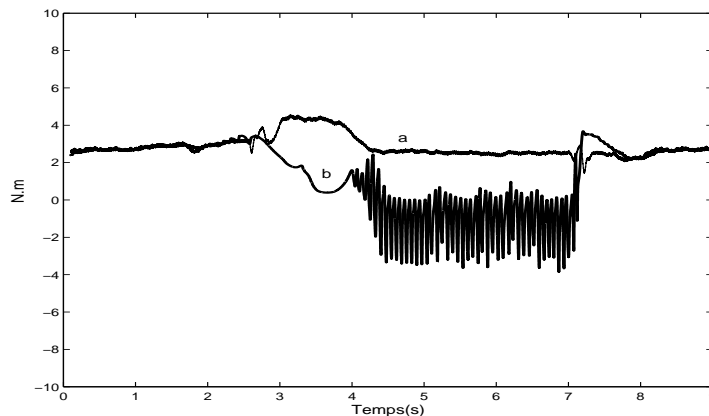


Figure 6: a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

## 4.2 Essai avec commutation de l'observateur en mode estimateur

Lorsque le moteur est proche des conditions inobservables, on commute l'observateur en mode estimateur (sans gains de correction de l'erreur de mesure). Les résultats ainsi obtenus sont montrés dans les figures 7 et 8. Nous pouvons remarquer que lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables, la vitesse estimée (Figure 7) est stable, il apparait uniquement un petit écart statique. La même conclusion est donnée pour le couple de charge estimé (Figure 8). Notons que le comportement de la vitesse et du couple de charge estimés est le même en mode observateur (dans les conditions observables) par rapport à l'essai précédent (sans commutation de l'observateur en mode estimateur, voir Figures 5 et 6).

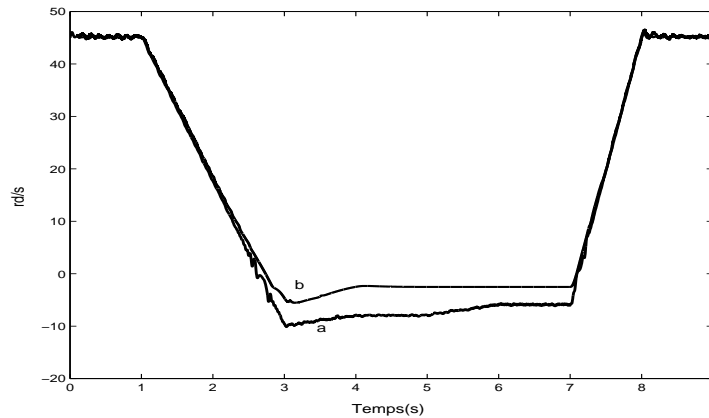


Figure 7: a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s). Commutation Observateur/Estimateur.

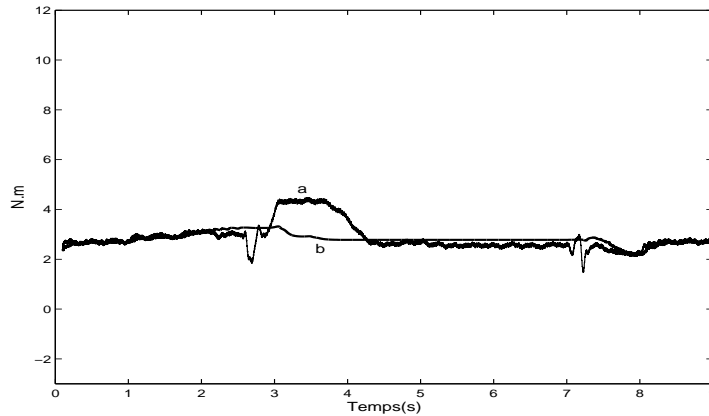


Figure 8: a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s). Commutation Observateur/Estimateur.

## 4.3 Analyse de la robustesse

Sur la plate forme d'essai de l'IRCCyN, il est difficile de faire varier les paramètres de la machine. Pour vérifier la robustesse, nous avons effectué des variations paramétriques sur l'observateur par rapport aux valeurs identifiées. La comparaison est faite par rapport à l'essai précédent (Essai avec commutation de l'observateur en mode estimateur).

Les figures (9, 10) et (11, 12) montrent respectivement qu'une variation de +50% et -50% sur la résistance rotorique engendre un écart statique sur la vitesse estimée (Figures 9, 11) et sur le couple de charge estimé (Figures 10, 12) dans les conditions observables par rapport à l'essai précédent (Figures 7, 8). La sensibilité de l'observateur est plus importante dans le cas de -50% de variation sur  $R_r$ . Cet écart statique est amplifié pour le couple de charge estimé (Figure 12) dans le cas de -50% de variation sur  $R_r$  lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables par rapport à l'essai précédent (Figure 8). On peut remarquer tout de même que l'observateur ainsi que l'estimateur restent stables, ce qui vérifient bien la stabilité attendue dans les conditions observables.

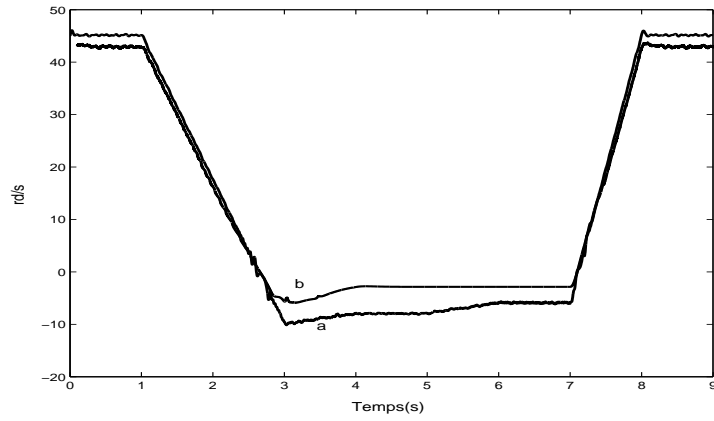


Figure 9: +50% sur  $R_r$ . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

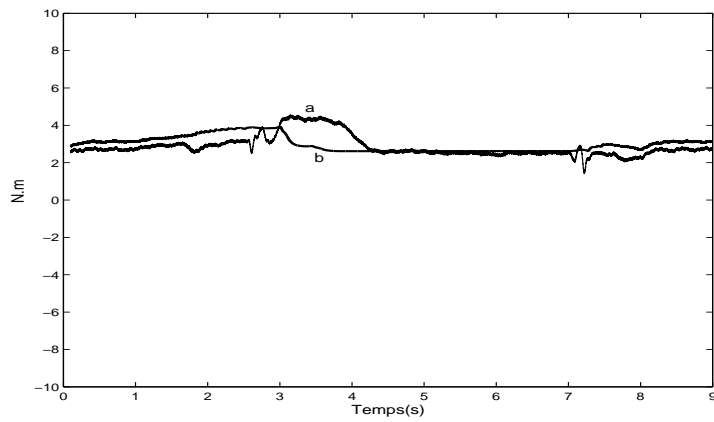


Figure 10: +50% sur  $R_r$ . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

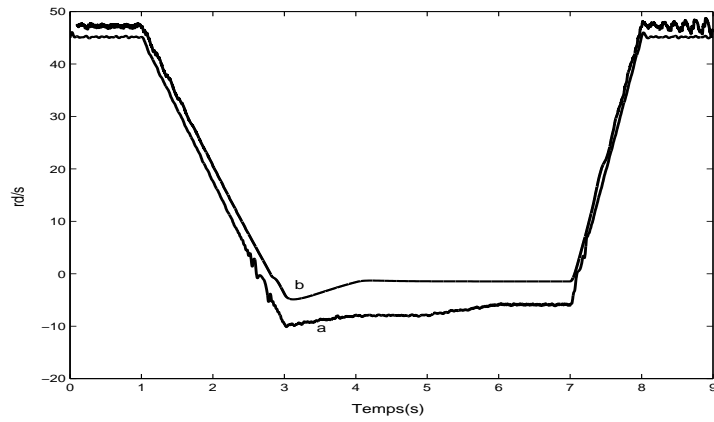


Figure 11: -50% sur  $R_r$ . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

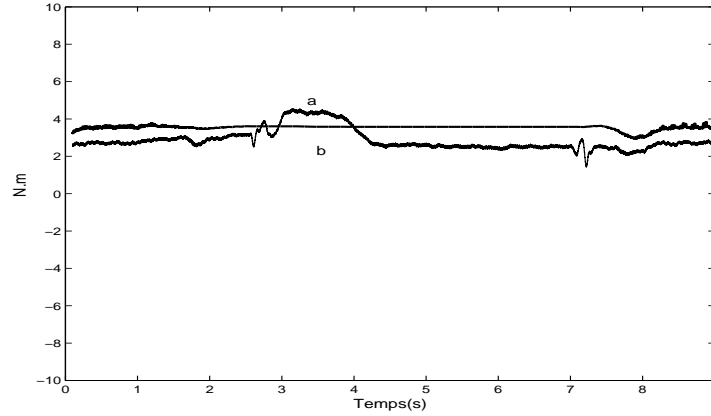


Figure 12: -50% sur  $R_r$ . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

Les figures (13, 14) et (15, 16) montrent respectivement qu'une variation de +15% et de -40% sur la résistance statorique n'influe peu ou pas les performances de l'observateur dans les conditions observables au niveau de la vitesse estimée (Figures 13, 15) par rapport à l'essai précédent (Figure 7). La conclusion est différente pour le couple de charge estimé (Figures 14, 16) où un écart statique est apparu par rapport à l'essai précédent (Figure 8). Dans les conditions inobservables, on peut remarquer que dans le cas de +15% de variation sur  $R_s$  l'écart statique sur le couple de charge estimé est amplifié (Figure 14) tandis qu'il est diminué sur la vitesse estimée (Figure 13) par rapport à l'essai précédent (Figure 8).

**Remarque 2.** Les performances de l'observateur sont acceptables dans les conditions inobservables pour des variations de paramètres allant jusqu'à +15% et -40% sur la résistance statorique. Dans les conditions observables, les variations peuvent être supérieures sans nuire à la robustesse de l'observateur.

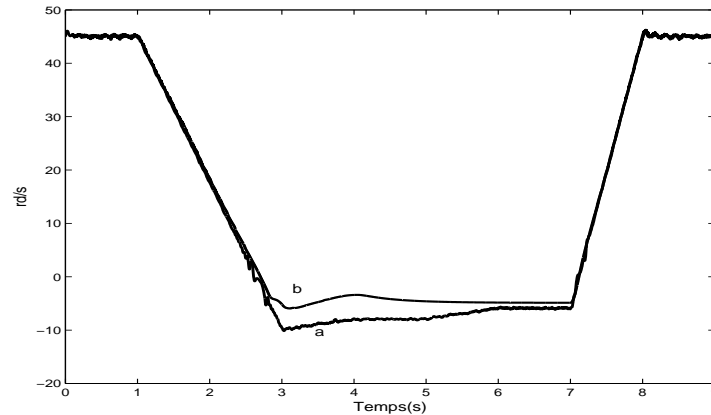


Figure 13: +15% sur  $R_s$ . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

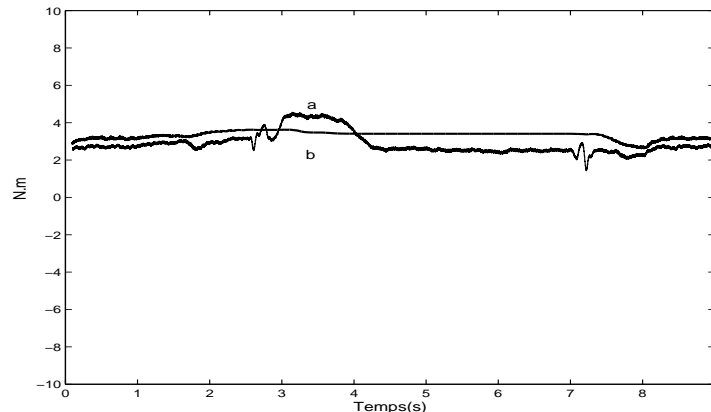


Figure 14: +15% sur  $R_s$ . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

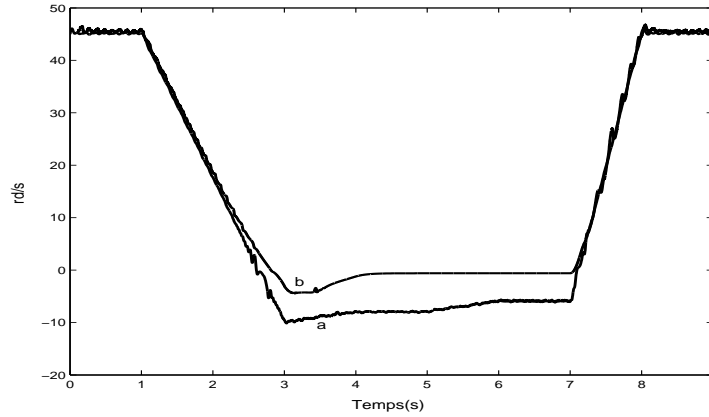


Figure 15: -40% sur  $R_s$ . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

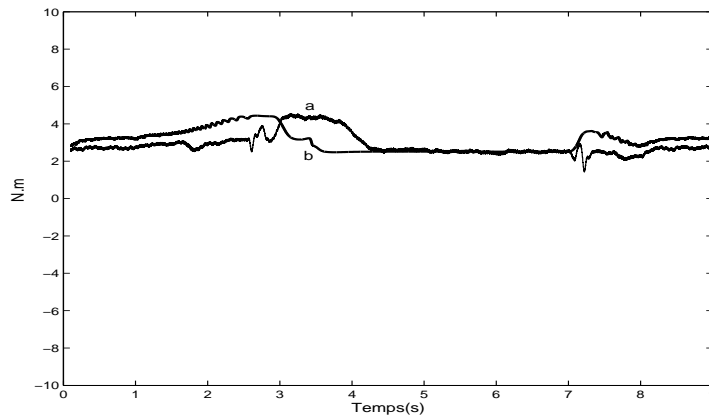


Figure 16: -40% sur  $R_s$ . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

Les figures (17, 18) et (19, 20) montrent respectivement la sensibilité paramétrique de l'observateur et de l'estimateur vis à vis de l'inductance rotorique et de l'inductance statorique. On peut remarquer qu'une variation de +20% sur la l'inductance rotorique influe peu sur les performances de l'observateur dans les conditions observables par rapport à l'essai précédent (Figures 7, 8). En revanche, lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables, l'observateur fonctionnant en estimateur est sensible à cette variation.

Le résultat est différent dans le cas de la variation de +20% sur l'inductance statorique . La vitesse et le couple de charge estimés (Figures 19 et 20) sont sensibles à cette variation, il apparaît un écart statique par rapport à l'essai précédent dans les conditions observables et inobservables (Figures 7, 8).

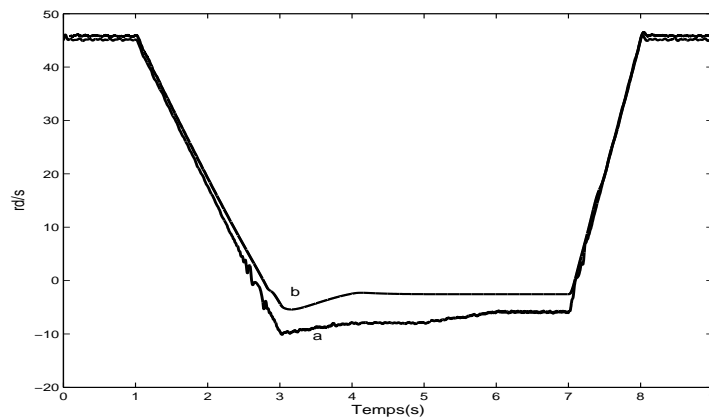


Figure 17: +20% sur  $L_r$ . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

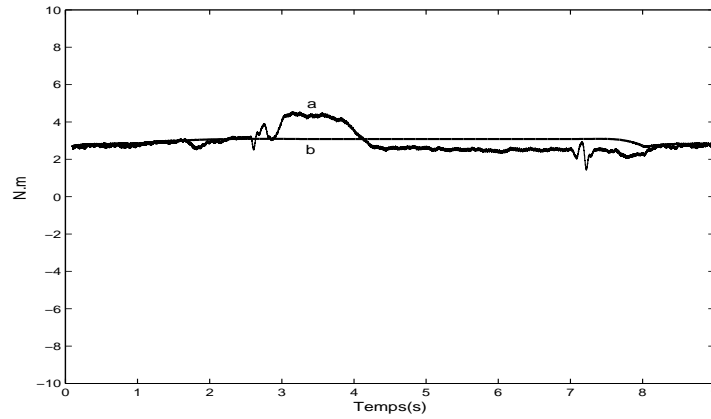


Figure 18: +20% sur  $L_r$ . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

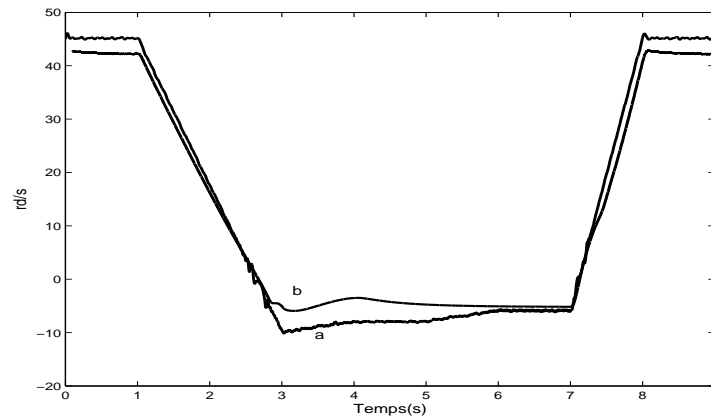


Figure 19: +20% sur  $L_s$ . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

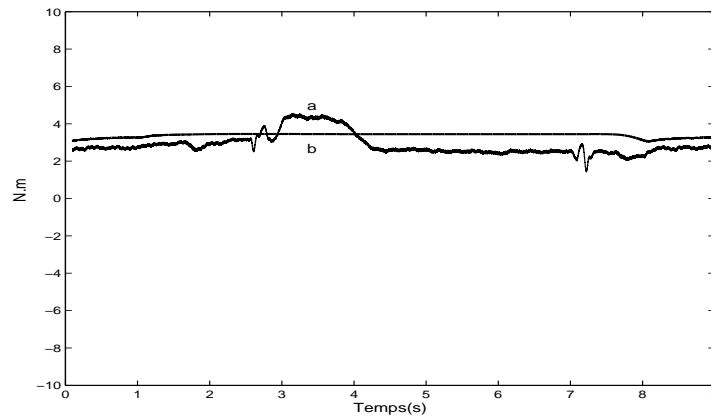


Figure 20: +20% sur  $L_s$ . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

## 5 Conclusion

Ce compte-rendu a présenté les résultats expérimentaux d'un observateur à grand gain interconnecté obtenus sur le benchmark "Observateur sans capteurs mécaniques". Ce benchmark évalue les performances des observateurs de la machine asynchrone sans capteur à basses vitesses. Ainsi que nous l'avions déjà obtenu en simulation, les résultats expérimentaux vérifient bien que l'observateur est instable lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables. Pour éviter ce comportement, nous avons commuté l'observateur

en mode estimateur ( sans gains de l'erreur d'estimation) lorsque la machine est proche des conditions inobservables (à basses vitesses). Par ailleurs, la robustesse de l'observateur à grand gain est vérifiée par des variations significatives des résistances (rotoriques et statoriques) et des inductances (rotoriques et statoriques) de la machine. Dans tous les cas, la vitesse mécanique de la machine est bien estimée même à basse vitesse.

La prochaine étape consiste à associer cet observateur à une commande non linéaire de la machine et d'évaluer les performances de l'ensemble "Commande+Observateur" sur le benchmark "Commande sans capteur" défini dans [5].

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Canudas de Wit, C., A. Youssef, J.P. Barbot, Ph. Martin and F. Malrait, "Observability Conditions of Induction Motors at low frequencies" *IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia, December 2000.
- [2] Chiasson, J., "NonLinear Controllers For Induction Motors" *IFAC Conference System Structure and Control*, Nantes 5-7 July 1995.
- [3] Ghanes, M., A. Girin and T. Saheb "Original Benchmark for sensorless induction motor drives at low frequencies and validation of high gain observer" American Control Conference ACC'04, Boston, Massachussets, USA, 30 juin-2 juillet 2004.
- [4] Ghanes, M., O. Huerta, J. DeLeon and A. Glumineau "Validation of an Interconnected High Gain Observer for Sensorless Induction Motor On Low Frequencies Benchmark: Application to an Experimental Set-up" 2nd IFAC Symposium on System, Structure and Control, Oaxaca, Mexico, 8-10 december 2004.
- [5] M.Ghanes, A.Glumineau, T. Saheb, F. Augers et L. Loron "Benchmarks pour la commande de la machine asynchrone sans capteur mécanique" 2003, Journées Nationales d'Automatique, JNA'03, Valenciennes, 25-27 juin 2003.
- [6] *Ibarra – Rojas*, S., J. Moreno and G. Espinosa, "Global observability analysis of sensorless induction motor" *Automatica*, Vol.40, Issue: 6, pp. 1079-1085, June 2004.
- [7] [www.irccyn.ec-nantes.fr/hebergement/BancEssai/](http://www.irccyn.ec-nantes.fr/hebergement/BancEssai/)