

Compte rendu de la validation d'un observateur cascade pour la MAS sans capteurs mécaniques sur la plate-forme d'essai de l'IRCCyN^{*}

Malek GHANES, Alain GLUMINEAU et Robert BOISLIVEAU

Le 10 avril 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 [6], [4]. 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. Le but de ce compte rendu est de montrer la validation expérimentale d'un observateur cascade pour la machine asynchrone sans capteurs mécaniques sur le benchmark Observateur qui a été implanté sur la plate-forme d'essais de l'IRCCyN [10]. La première section du compte rendu présente le modèle de la machine asynchrone. La deuxième section est consacrée à la présentation du nouveau benchmark "Observateur sans capteurs" ainsi qu'à un bref descriptif de la plate forme d'essai. Dans la troisième section nous présenterons l'observateur cascade et ses résultats expérimentaux obtenus sur le benchmark.

1.1 Modèle de la MAS

Le modèle de la machine asynchrone présenté ici est celui qui est utilisé par la suite pour la synthèse de l'observateur cascade.

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 (α - β). 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 $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\phi_{r\alpha}$, $\phi_{r\beta}$, $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$, Ω , 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 , γ , σ , m et

^{*}Ce travail s'inscrit dans le cadre des activités du groupe inter GDR "Commandes des entraînements électriques", <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/CE2/>

m_1 sont définis par:

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

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 considéré comme une perturbation. Seuls les courants statoriques et tensions statoriques sont mesurables.

2 Benchmark Observateur sans capteur mécanique

Enoncé dans [1], [8], le problème de l'observabilité de la machine asynchrone a été caractérisé 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 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) sont obtenus via le logiciel 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.

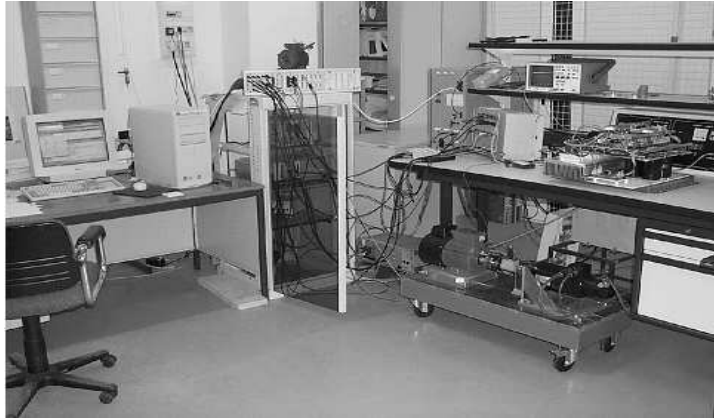


Figure 1: Plate forme d'essai de IRCCyN.

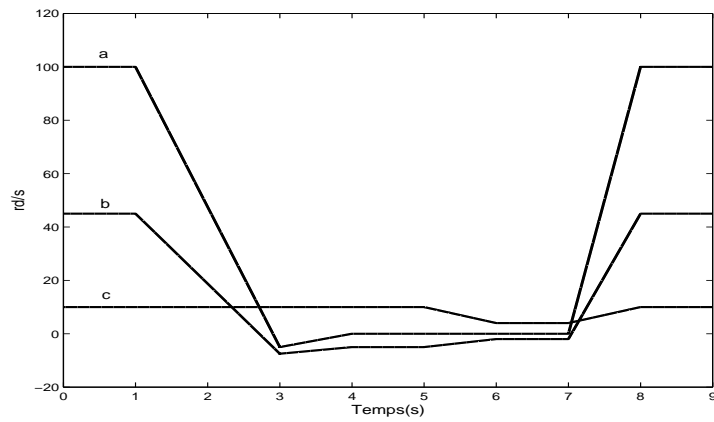


Figure 2: Trajectoires du Benchmark Observateur: a) pulsation statorique de référence (rd/s), b) vitesse de référence (rd/s), c) pulsation de glissement de référence en fonction du temps (s).

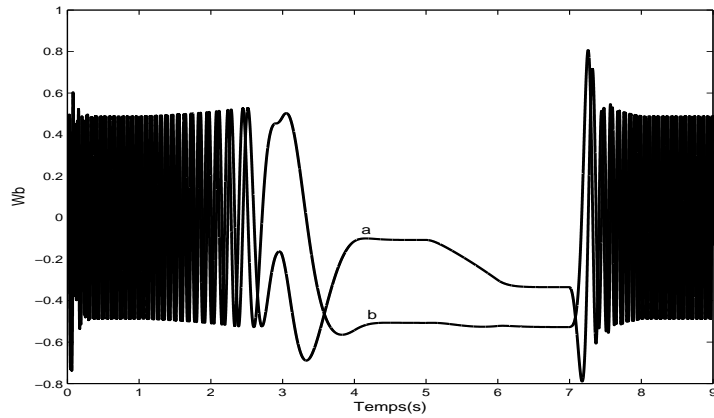


Figure 3: Composantes du flux rotorique: a) $\Phi_{r\alpha}$, b) $\Phi_{r\beta}$ (Wb) en fonction du temps (s).

3 Synthèse de l'observateur cascade

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

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{\Omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & bp\phi_{r\beta} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ \Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\gamma i_{s\alpha} + ab\phi_{r\alpha} + m_1 u_{s\alpha} \\ m(\phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \phi_{r\beta} i_{s\alpha}) - c\Omega - T_l/J \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\phi}_{r\alpha} \\ \dot{\phi}_{r\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\gamma i_{s\beta} - bp\phi_{r\alpha}\Omega + ab\phi_{r\beta} + m_1 u_{s\beta} \\ aM_{sr}i_{s\alpha} - a\phi_{r\alpha} - p\Omega\phi_{r\beta} \\ aM_{sr}i_{s\beta} - a\phi_{r\beta} + p\Omega\phi_{r\alpha} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

De plus les sous-systèmes précédents (2) et (3) sont sous la forme interconnectée suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= A_1(u, y, X_2)X_1 + g_1(u, y, X_2, X_1) \\ y_1 &= C_1X_1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_2 &= A_2X_2 + g_2(u, y, X_2, X_1) \\ y_2 &= C_2X_2 \end{aligned} \quad (5)$$

où

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & bp\phi_{r\beta} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad g_1(u, y, X_2, X_1) = \begin{pmatrix} -\gamma i_{s\alpha} + ab\phi_{r\alpha} + m_1 u_{s\alpha} \\ m(\phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \phi_{r\beta} i_{s\alpha}) - c\Omega - T_l/J \end{pmatrix};$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} -\gamma & 0 & ab \\ 0 & -a & 0 \\ -ab & 0 & -a \end{pmatrix}; \quad g_2(u, y, X_2, X_1) = \begin{pmatrix} -bp\Omega\phi_{r\alpha} + m_1 u_{s\beta} \\ -p\Omega\phi_{r\beta} + aM_{sr}i_{s\alpha} \\ p\Omega\phi_{r\alpha} + a(M_{sr} + b)i_{s\beta} \end{pmatrix}$$

et $X_1 = \text{col}(x_{11}, x_{12})$ avec $x_{11} = i_{s\alpha}$, $x_{12} = \Omega$, $C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}$; $X_2 = \text{col}(x_{21}, x_{22}, x_{23})$ avec $x_{21} = i_{s\beta}$, $x_{22} = \phi_{r\alpha}$, $x_{23} = \phi_{r\beta}$, $C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$. $u = [u_{s\alpha}, u_{s\beta}]^T$, $y = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}]^T$.

L'objectif recherché est la conception d'un observateur cascade pour le sous-système (4), qui est basé sur l'approche cascade (voir [9]), et un estimateur pour le sous-système (5).

Supposant que l'hypothèse suivante :

Les variables u , y et X_2 sont considérées comme des entrées connues pour le sous-système (4).

Définissons $v := [u, y, X_2]^T$.

soit vérifiée alors le sous-système (4) s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= A_1(v)X_1 + g_1(v, X_1) \\ y_1 &= C_1X_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Dans le but de construire l'observateur cascade pour le sous-système (6), nous posons les hypothèses suivantes:

1. v est bornée et supposée être régulièrement persistante [7] pour garantir la propriété d'observabilité du sous-système (6).
2. $X_1 \in D_1$ de \mathfrak{R}^{n_1} et $X_2 \in D_2$ de \mathfrak{R}^{n_2} , où n_1 et n_2 sont les dimensions des sous-systèmes (4) et (5) respectivement.

3. $A_1(u, y, X_2)$ est globalement Lipschitz par rapport à X_2 et uniformément par rapport à (u, y) .
4. $g_1(u, y, X_2, X_1)$ est globalement Lipschitz par rapport à X_1 et uniformément par rapport à (u, y, X_2) .
5. $g_2(u, y, X_2, X_1)$ est globalement Lipschitz par rapport à X_2 et uniformément par rapport à (u, y, X_1) .

En supposant que les hypothèses précédentes sont vérifiées, alors un observateur pour le sous-système (6) est donné par ([3]):

$$\begin{aligned}\dot{Z}_1 &= A_1(v)Z_1 + g_1(v, Z_1) + M(v)C_1(X_1 - Z_1) \\ \hat{y}_1 &= C_1Z_1\end{aligned}\tag{7}$$

où $Z_1 = \text{col}(z_{11}, z_{12})$ with $z_{11} = \hat{i}_{s\alpha}$, $z_{12} = \hat{\Omega}$ et les gains de l'observateur sont donnés par :

$$M(v)C_1 = \Gamma^{-1}(v)\Delta_\theta^{-1}KC_1\tag{8}$$

où $\Gamma = \text{diag}(1, \zeta(v))$ $\Delta_\theta = \text{diag}(\frac{1}{\theta}, \frac{1}{\theta^2})$ avec $\zeta(v) = bp\hat{\phi}_{r\beta}$, $\theta > 0$ et $K = (K_1, K_2)^T$ est tel que la matrice $(\bar{A} - KC_1)$ est stable où $\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$.

Remarque 1.

1. La propriété d'observabilité de (6) est satisfaite (hypothèse A2.1) et par conséquent $\phi_{r\beta}$ est différent de zéro sauf pour des temps très courts (la machine asynchrone doit être fluxée pour la conversion de l'énergie électromécanique). En pratique, pour éviter des gains larges de Γ^{-1} un bloc permettant d'éviter la division par zéro quand $\phi_{r\beta}$ passe par zéro est utilisé dans le schéma de simulation.

2. Les flux $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$ ne sont pas mesurés, nous les estimons alors par l'estimateur du sous-système(5). Les variables actuelles des flux utilisées dans l'observateur (7) sont remplacées par leur estimées.

L'estimateur du sous-système (5) permettant d'estimer les flux est donné par les équations suivantes:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_2 &= A_2Z_2 + g_2(u, y, Z_2, Z_1) \\ \hat{y}_2 &= C_2Z_2\end{aligned}\tag{9}$$

De plus, un estimateur du couple de charge T_l est donné par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}\hat{T}_l &= Jm(-\hat{\phi}_{r\beta}z_{11} + \hat{\phi}_{r\alpha}\hat{i}_{s\beta}) - Jcz_{12} - J\frac{d}{dt}z_{12} \\ &+ J\frac{\theta^2K_2}{bp\hat{\phi}_{r\beta}}(x_{11} - z_{11}).\end{aligned}\tag{10}$$

où $\frac{d}{dt}z_{12}$ est calculée par une différentiation numérique.

De plus amples détails sur la construction de l'observateur et sa preuve de convergence sont donnés dans [3].

4 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de l'observateur cascade obtenus sur le benchmark observateur sont présentés ci-dessous.

Le schéma simulink du benchmark utilisé sur la plate forme d'essai pour expérimenter l'observateur est donné par la figure suivante:

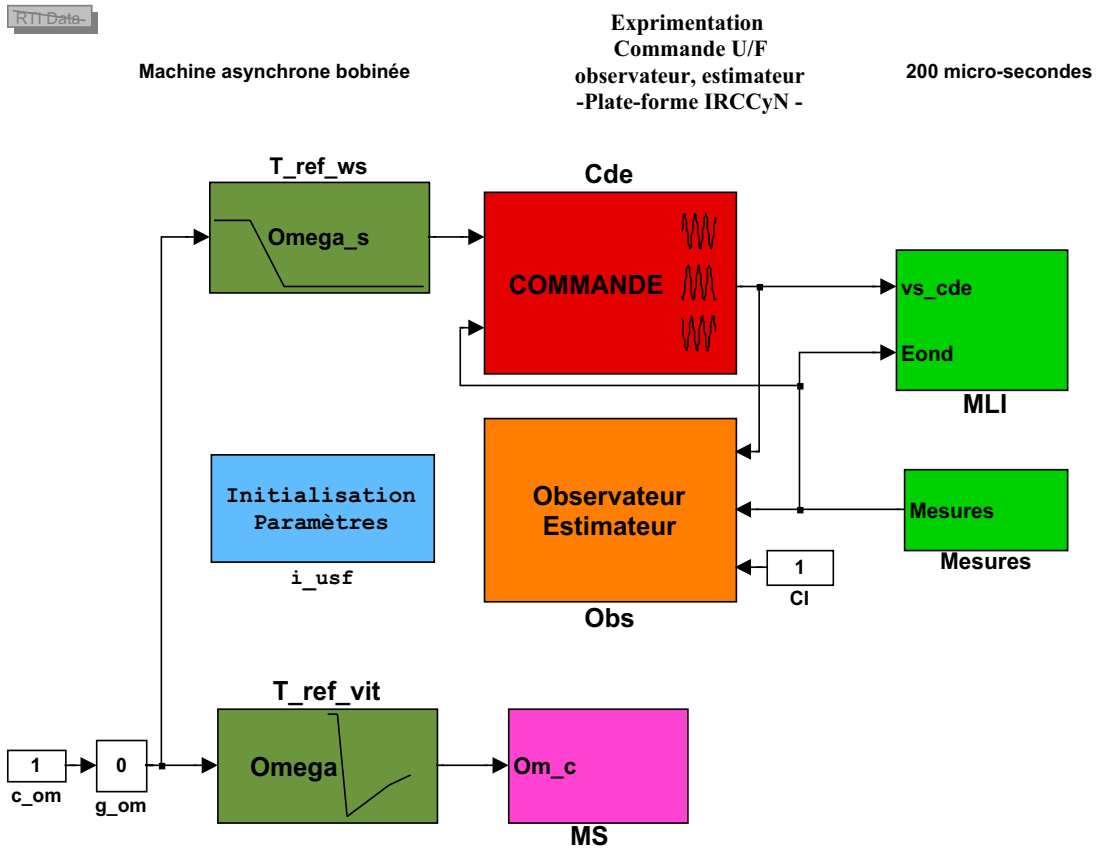


Figure 4: Schéma simulink du benchmark observateur utilisé sur la plate forme de l'IRCCyN.

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 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 cascade interconnecté à l'estimateur qui utilise uniquement les mesures des tensions statoriques vs_cde et des 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 période d'échantillonnage est de $200\mu s$.

La machine asynchrone à rotor bobiné utilisée a les caractéristiques suivantes : [10]
Puissance nominale : 1.5kW;

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

Les paramètres identifiés "nominaux" de la machine asynchrone utilisés sont :
 $R_s = 1.633\Omega$; $R_r = 0.93\Omega$; $L_s = 0.142H$; $L_r = 0.076H$; $M_{sr} = 0.099H$; $J = 0.0111/rad/s^2$;
 $f_v = 0.0018Nm/rad/s$. Les paramètres θ , K_1 et K_2 sont choisis comme suit: $\theta = 500$, $K_1 = 0.001$
 et $K_2 = 0.1$ 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 estimés dans le cas "nominal".

Remarque 2. 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.

Dans les conditions observables, la vitesse estimée (Figure 5) est reconstruite correctement. Cette vitesse estimée diverge (Figure 5) lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables. 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). Une solution que l'on propose pour éviter ce comportement est d'adapter les gains de l'observateur à la propriété de l'observabilité de la machine, comme nous allons le montrer dans l'essai suivant.

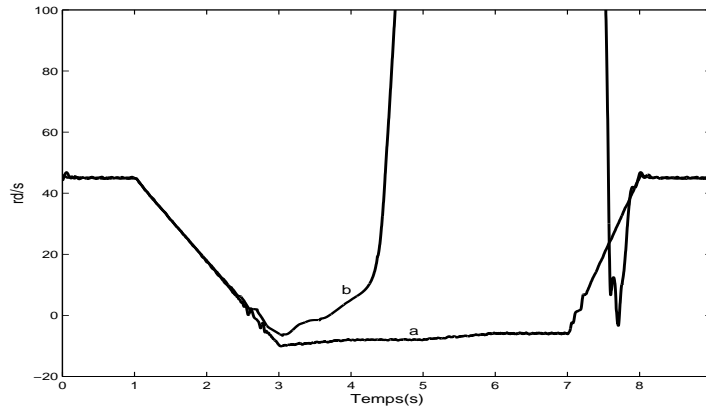


Figure 5: a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

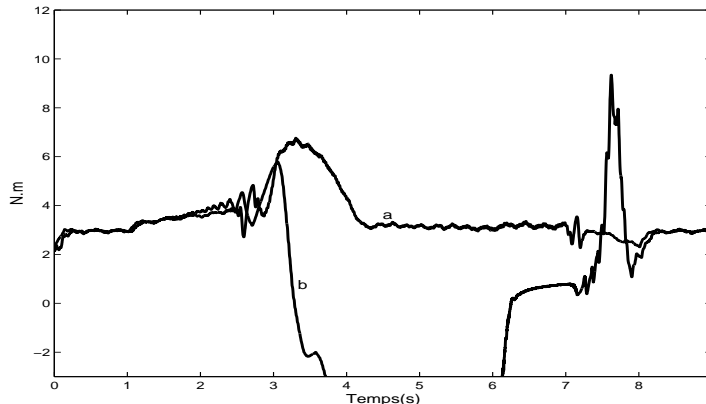


Figure 6: a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

4.2 Essai avec passage du mode observateur au mode estimateur

Lorsque le moteur est proche et dans des conditions inobservables, on "commute" l'observateur en mode estimateur (en réglant les gains en fonction de l'observabilité de la machine). Les résultats ainsi obtenus sont montrés dans les figures 7 et 8. Nous remarquons 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). Evidemment, dans les conditions observables, les résultats de l'observateur sont les mêmes que pour l'essai précédent (c.f. Figures 5 et 6).

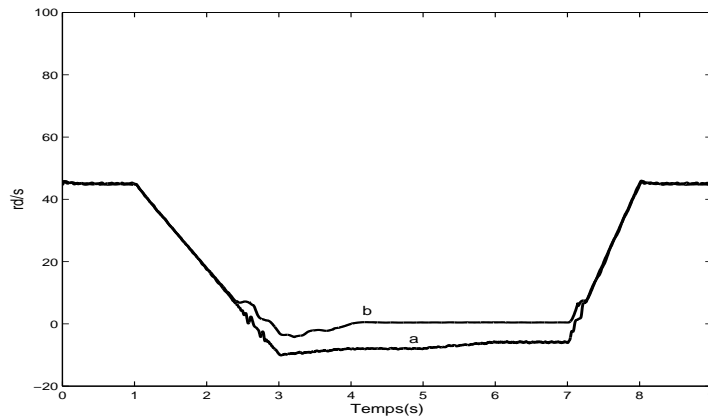


Figure 7: a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s). Commutation Observateur/Estimateur.

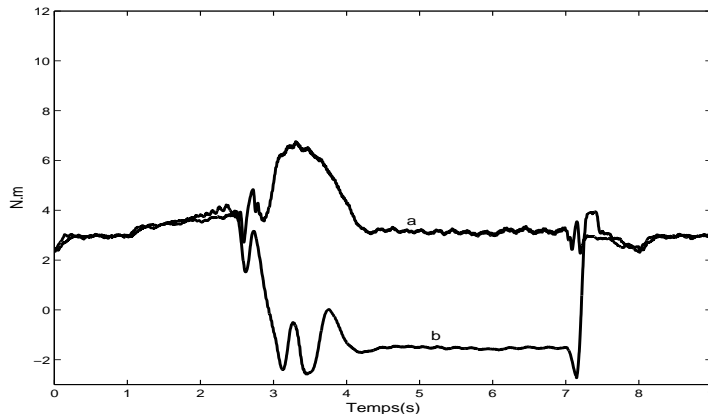


Figure 8: a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s). Commutation Observateur/Estimateur.

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).

4.3.1 Variation de +50% et -50% sur R_r

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) dans les conditions observables par rapport à l'essai précédent (Figures 7, 8) contrairement au couple de charge estimé (Figures 10, 12) qui reste insensible à ces variations. Lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables, l'écart statique est diminué pour le couple de charge estimé dans le cas de +50% et -50% de variation sur R_r (Figures 10, 12) 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 vérifie bien la robustesse attendue dans les conditions observables.

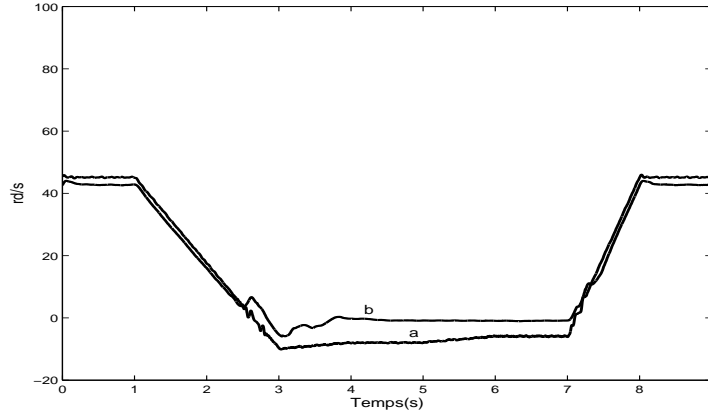


Figure 9: +50% sur R_r . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

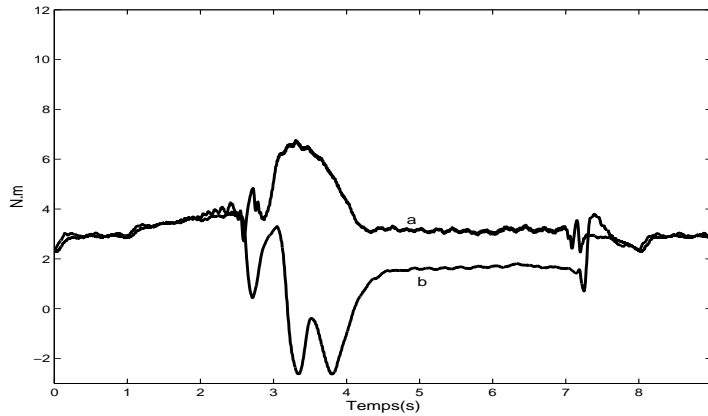


Figure 10: +50% sur R_r . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

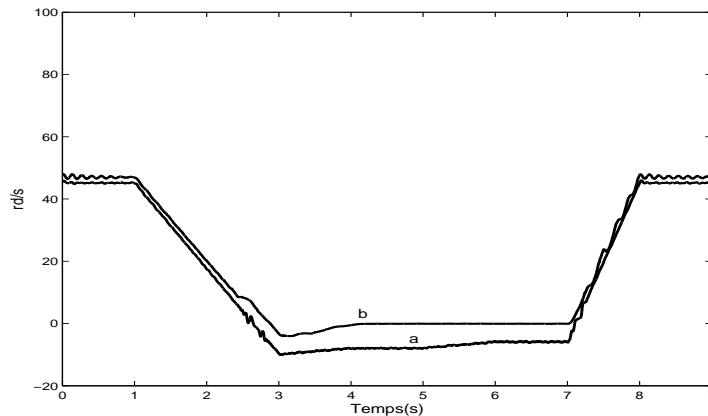


Figure 11: -50% sur R_r . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

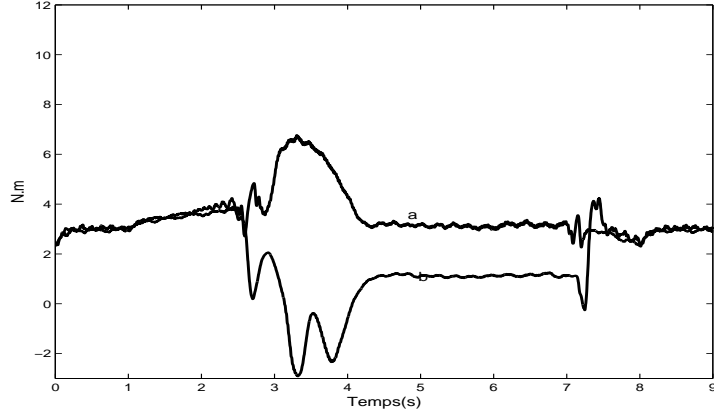


Figure 12: -50% sur R_r . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

4.3.2 Variation de +50% et -20% sur R_s

Les figures (13, 14) et (15, 16) montrent respectivement qu'une variation de +50% et de -20% 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 dans le cas d'une variation de +50% sur R_s (Figure 14) où un écart statique est apparu par rapport à l'essai précédent (Figure 8). Lorsque la machine est proche et dans les conditions inobservables, l'écart statique sur le couple de charge estimé est amplifié (Figure 16) dans le cas d'une variation de -20% sur R_s tandis qu'il est diminué sur la vitesse estimée (Figure 15) par rapport à l'essai précédent (Figure 8).

Remarque 3. Les performances de l'observateur sont acceptables dans les conditions inobservables pour des variations de paramètres allant jusqu'à -20% sur la résistance statorique. Dans les conditions observables, les variations peuvent être supérieures sans nuire à la robustesse de l'observateur.

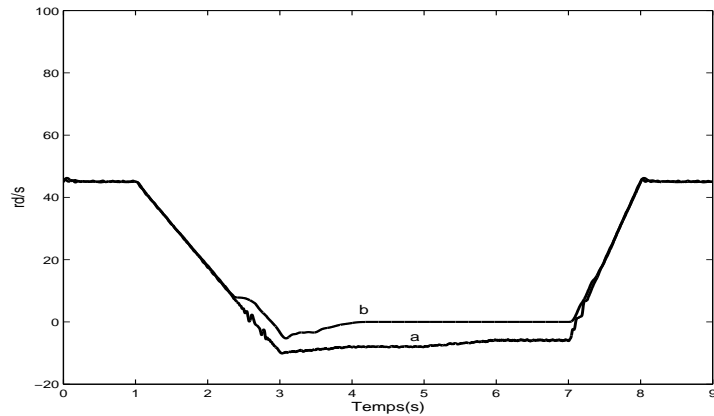


Figure 13: +50% sur R_s . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

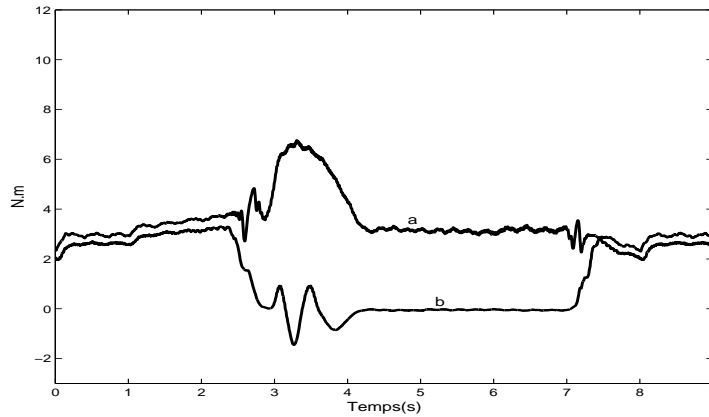


Figure 14: +50% sur R_s . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

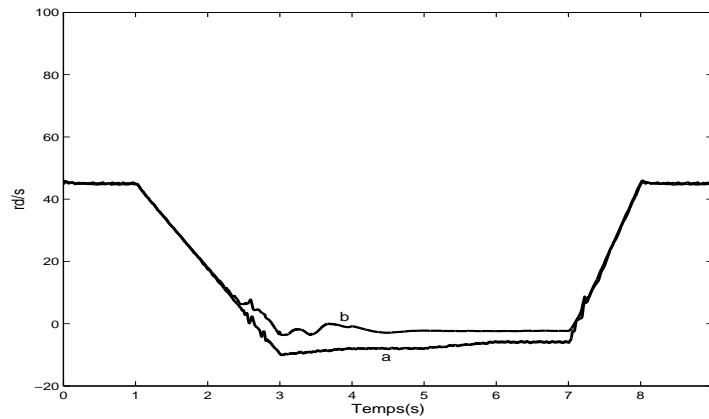


Figure 15: -20% sur R_s . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

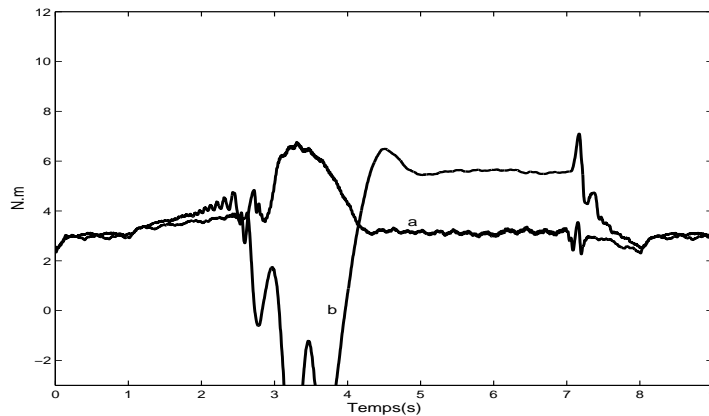


Figure 16: -20% sur R_s . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

4.3.3 Variation de +20% sur L_r et +20% sur L_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 l'inductance rotorique et de l'inductance statorique influe de manière significative sur les performances de l'observateur dans les conditions observables et inobservables par rapport à l'essai précédent (Figures 7, 8). La sensibilité de l'observateur au niveau du

couple de charge estimé (Figure 20) est plus significative dans le cas de la variation de +20% sur l'inductance statorique.

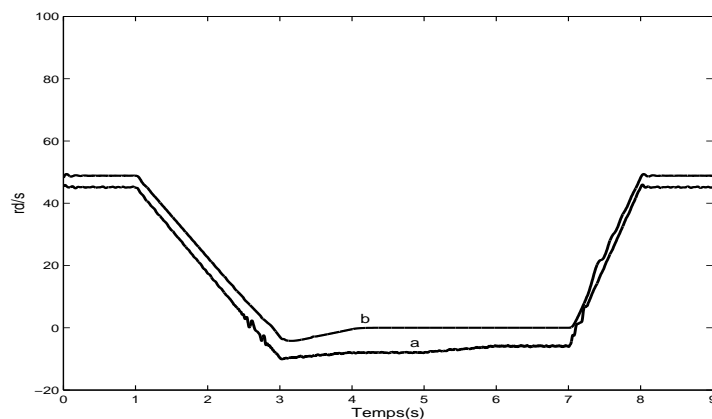


Figure 17: +20% sur L_r . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

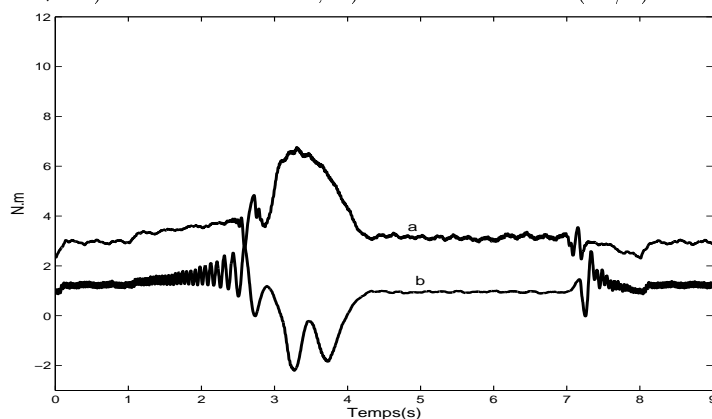


Figure 18: +20% sur L_r . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

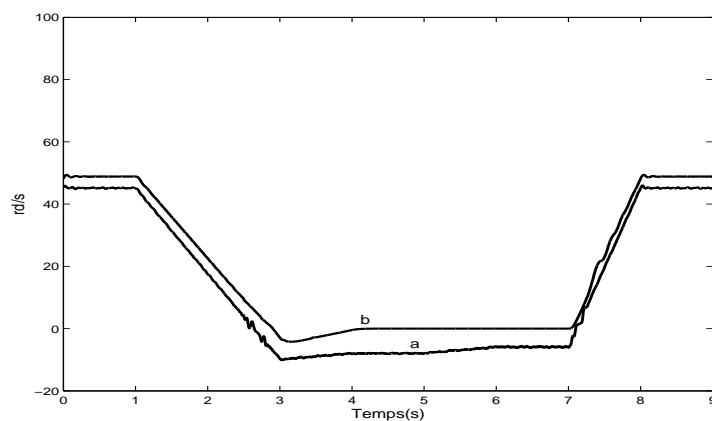


Figure 19: +20% sur L_s . a) Vitesse mesurée, b) Vitesse estimée (rd/s) en fonction du temps (s).

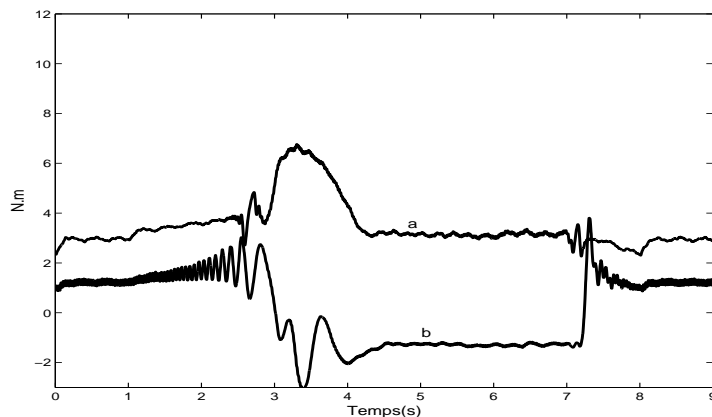


Figure 20: +20% sur L_s . a) Couple de charge mesuré, b) Couple de charge estimé (N.m) en fonction du temps (s).

4.3.4 Comparaison avec les résultats de l'observateur à grand gain interconnecté (voir rapport [5])

En comparaison des résultats expérimentaux de l'observateur cascade avec ceux obtenus avec l'observateur à grand gain interconnecté (voir rapport [5]), nous remarquons que:

1. Dans le cas "nominal", les deux observateurs ont un comportement différent lorsque la machine est proche et dans les conditions inobservables. L'observateur cascade diverge tandis que l'observateur à grand gain interconnecté a un comportement oscillatoire.
2. En terme de robustesse :
 - l'observateur cascade est plus robuste par rapport à l'observateur à grand gain interconnecté (voir rapport [5]) dans le cas d'une variation de +50% sur la résistance statorique. En revanche, il l'est moins dans le cas d'une variation supérieure à -20% sur la résistance statorique.
 - l'observateur cascade est moins robuste pour une variation de +20% sur l'inductance rotorique comparativement à l'observateur à grand gain interconnecté qui est pratiquement insensible à cette variation (voir rapport [5]).

5 Conclusion

Les résultats expérimentaux d'un observateur cascade obtenus sur le benchmark observateur sans capteurs mécaniques sont présentés dans ce compte rendu. Ce benchmark évalue les performances des observateurs de la machine asynchrone sans capteurs mécaniques à basses vitesses. Les résultats obtenus vérifient bien que l'observateur diverge lorsque la machine est proche et dans des conditions inobservables. Pour éviter ce comportement, nous avons commuté l'observateur en mode estimateur (en réglant les gains en fonction de l'observabilité de la machine) lorsque la machine est proche des conditions inobservables (à basses vitesses). La robustesse de l'observateur cascade 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 [6].

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., J. DeLeon and A. Glumineau "Experimental results of a Cascade Observer for sensorless induction motor on low frequencies Benchmark" IFAC World Congress, Prague, Czech Republic 4-8 july 2005.
- [4] 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.
- [5] Ghanes, M., A. Glumineau et R. Boiliveau "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" Rapport interne, mars 2004. (www.irccyn.ec-nantes.fr/hebergement/BancEssai/).
- [6] 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.
- [7] Hammouri, H., J. DeLeon, "Observer synthesis for state-affine systems" *Proc 29th IEEE Conference on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii. 1990. pp. 784-785.
- [8] *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.
- [9] Schreier, G, J. DeLeon, A. Glumineau and R. Boisliveau, "Cascade Nonlinear Observers: Application to an Experimental Induction Motor Benchmark. " *IEE Proceeding-Control Theory and Applications*, Vol. 148, N°6, pp. 509-515, Novembre 2001.
- [10] www.irccyn.ec-nantes.fr/hebergement/BancEssai/