

# COMMANDE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ BASÉE SUR L'APPROCHE DES MODES GLISSANTS AVEC OBSERVATEURS DE FLUX ET DE VITESSE

Présenté par:

**Mehdi BAGHLI**

**Oussama MERAD BOUDIA**

Encadré par: **Mr. Abdelkader MECHERNENE**

Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen  
Département de génie électrique et électronique

01 Juillet 2013

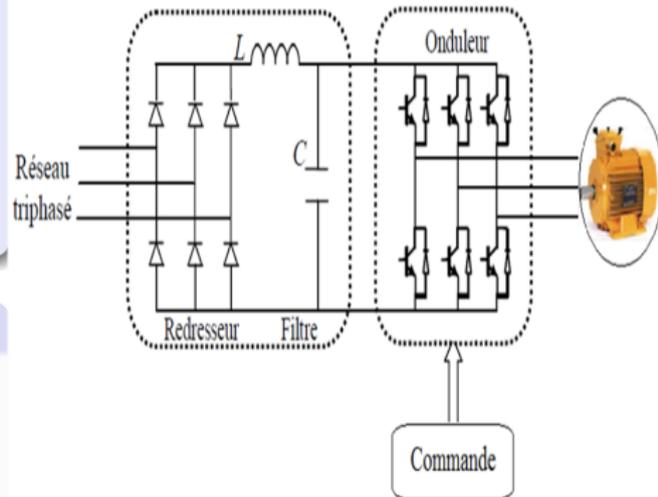
# Pourquoi La machine asynchrone ?

## Machine asynchrone

- ⇒ Moins cheres du marché
- ⇒ Simplicité de construction
- ⇒ Absence de Collecteur-Balais
- ⇒ Poids et Inertie faibles
- ⇒ Bon rendement

## Problèmes

- Non-linéaire
- Fortement couplée
- Multivariable
- ⇒ **Commande complexe**



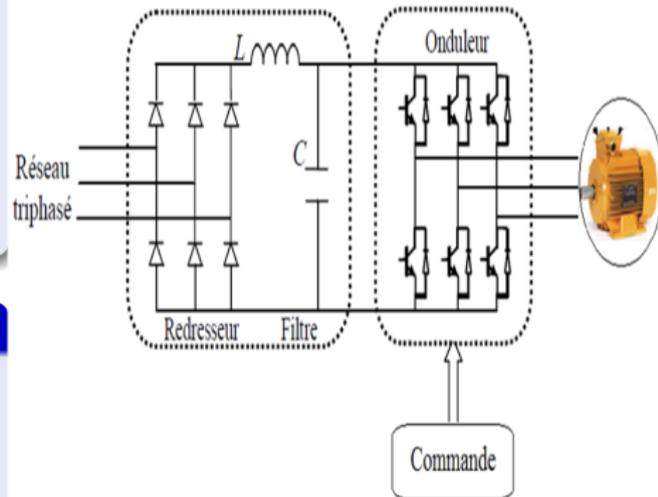
# Pourquoi La machine asynchrone ?

## Machine asynchrone

- ⇒ Moins cheres du marché
- ⇒ Simplicité de construction
- ⇒ Absence de Collecteur-Balais
- ⇒ Poids et Inertie faibles
- ⇒ Bon rendement

## Problèmes

- Non-linéaire
- Fortement couplée
- Multivariable
- ⇒ **Commande complexe**



# Types de commandes

## Commande scalaire

- Loi  $U/f = cste$

## Commande vectorielle à flux rotorique orienté

- Indirect (**K. Hasse 1969**)
- Direct (**F. Blaschke 1972**)

## Commande directe du couple

- Classique, Décalée, Svm, ...

## Commande par Mode Glissant

- Systèmes à structure variable

## Commandes basées sur l'automatique avancé

- Backstepping, Linéarisation entrée-sortie, Perturbation singulière, ...

# Pourquoi une commande sans capteur ?

## Commande avec capteur

- ⇒ Élément couteux
- ⇒ Fragilité
- ⇒ Maintenance
- ⇒ Difficulté de montage
- ⇒ Sensibilité envers les perturbations extérieures

## Suppression des capteurs mécaniques

- Capteur indirect (capteur logiciel)
- ⇒ Estimateur (BO : basé sur le glissement, loi d'autopilotage, ...)
- ⇒ Observateur (BF : Luenberger, Adaptatif, Kalman, SMC, ...)

# Pourquoi une commande sans capteur ?

## Commande avec capteur

- ⇒ Élément coûteux
- ⇒ Fragilité
- ⇒ Maintenance
- ⇒ Difficulté de montage
- ⇒ Sensibilité envers les perturbations extérieures

## Suppression des capteurs mécaniques

- Capteur indirect (capteur logiciel)
- ⇒ Estimateur (**BO** : basé sur le glissement, loi d'autopilotage, ...)
- ⇒ Observateur (**BF** : Luenberger, Adaptatif, Kalman, SMC, ...)

# Problématique et objectifs

## Problématique

- Amélioration des performances d'un entraînement électrique
- Amélioration de l'estimation du flux rotorique
- Suppression du capteur de vitesse

## Objectifs

- Mise en évidence des insuffisances de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique
- Synthèse d'une commande par mode glissant
- Remplacement de l'estimateur de flux par un observateur
- Remplacement du capteur de vitesse par un observateur

# Problématique et objectifs

## Problématique

- Amélioration des performances d'un entraînement électrique
- Amélioration de l'estimation du flux rotorique
- Suppression du capteur de vitesse

## Objectifs

- Mise en évidence des insuffisances de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique
- Synthèse d'une commande par mode glissant
- Remplacement de l'estimateur de flux par un observateur
- Remplacement du capteur de vitesse par un observateur

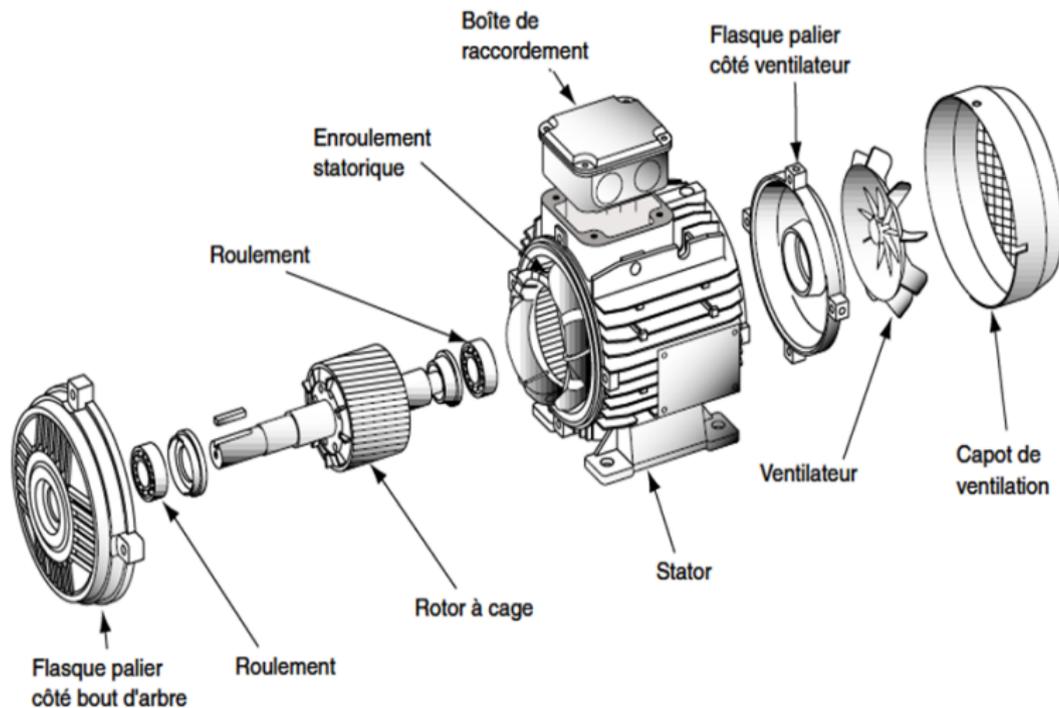
# Plan de la présentation

- 1 Modélisation du MAS et de son convertisseur
- 2 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique
- 3 Commande à structure variable par mode de glissement
- 4 Commande sans capteur avec observateur de flux et de vitesse
- 5 Conclusion et perspectives

# CHAPITRE I :

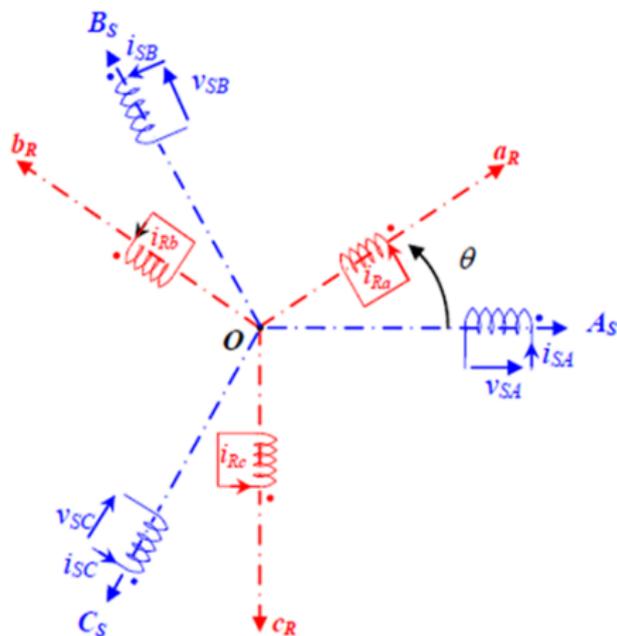
## Modélisation du MAS et de son convertisseur

# Organisation de la MAS à cage



# Modèle dynamique de la MAS

- Le modèle est constitué de trois types d'équations :
  - Équations électriques
  - Équations magnétiques
  - Équation mécanique



# Modèle dynamique de la MAS dans le référentiel $(A,B,C)$

## Équations électriques

$$\begin{cases} [V_{SABC}] = [R_S] \cdot [i_{SABC}] + \frac{d}{dt} \cdot [\phi_{SABC}] \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \cdot [\phi_{rabc}] \end{cases}$$

## Équations magnétiques

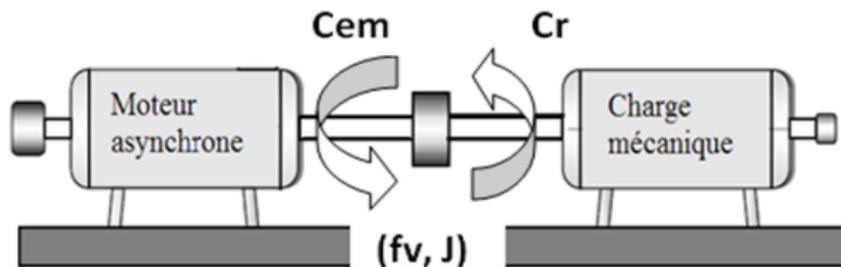
$$\begin{cases} [\phi_{SABC}] = [L_{SS}] \cdot [i_{SABC}] + [M_{Sr}] \cdot [i_{rabc}] \\ [\phi_{rabc}] = [L_{rr}] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rS}] \cdot [i_{SABC}] \end{cases}$$

$$\triangleright [M_{Sr}] = [M_{rS}]^T = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

# Modèle dynamique de la MAS dans le référentiel $(A,B,C)$

## Équation mécanique

$$C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f_v \cdot \Omega + C_r$$



$f_v$  : Coefficient du frottement visqueux

$J$  : Moment d'inertie

# Modèle dynamique de la MAS dans le repère $(d,q)$

## Équations électriques

$$\begin{cases} V_{Sd} = R_S \cdot i_{Sd} + \frac{d\phi_{Sd}}{dt} - \omega_S \cdot \phi_{Sq} \\ V_{Sq} = R_S \cdot i_{Sq} + \frac{d\phi_{Sq}}{dt} + \omega_S \cdot \phi_{Sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} = 0 \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} = 0 \end{cases}$$

## Équations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{Sd} = M_{Sr} \cdot i_{rd} + L_{SS} \cdot i_{Sd} \\ \phi_{Sq} = M_{Sr} \cdot i_{rq} + L_{SS} \cdot i_{Sq} \\ \phi_{rd} = M_{Sr} \cdot i_{Sd} + L_{rr} \cdot i_{rd} \\ \phi_{rq} = M_{Sr} \cdot i_{Sq} + L_{rr} \cdot i_{rq} \end{cases}$$

# Représentation d'état

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g \cdot u \\ y = h(x) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} x &= [I_{sd} \ I_{sq} \ \phi_{rd} \ \phi_{rq} \ \omega_r]^T \\ y &= I_s = [I_{sd} \ I_{sq}]^T \\ u &= V_s = [V_{sd} \ V_{sq}]^T \end{aligned}$$

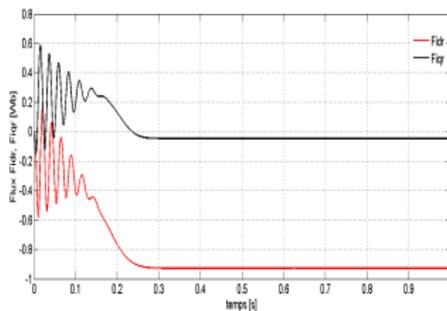
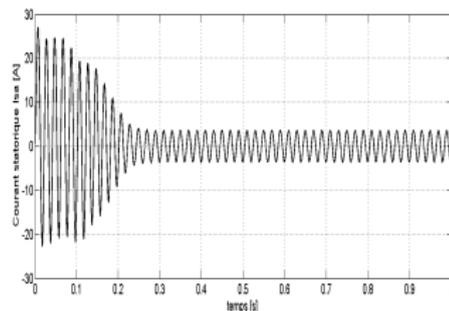
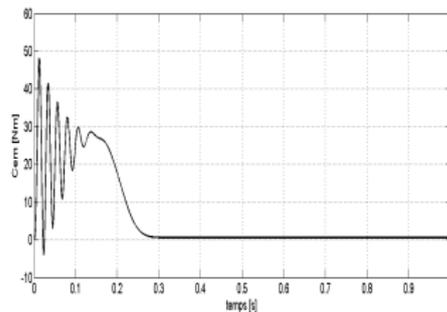
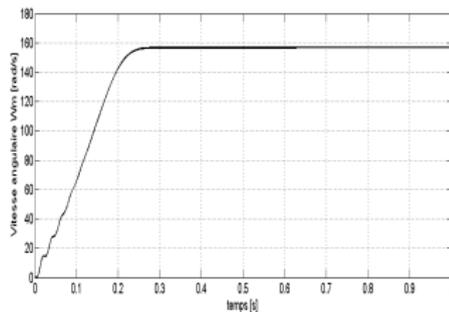
$$f(x) = \begin{bmatrix} -\lambda \cdot I_{sd} + \omega_s \cdot I_{sq} + \frac{K}{T_r} \cdot \phi_{rd} + K \cdot \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ -\omega_s \cdot I_{sd} - \lambda \cdot I_{sq} - K \cdot \omega_r \cdot \phi_{rd} + \frac{K}{T_r} \cdot \phi_{rq} \\ \frac{M_{sr}}{T_r} \cdot I_{sd} - \frac{1}{T_r} \cdot \phi_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{rq} \\ \frac{M_{sr}}{T_r} \cdot I_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{rd} - \frac{1}{T_r} \cdot \phi_{rq} \\ \frac{3}{2} \cdot \frac{p^2 \cdot M_{sr}}{J \cdot L_r} \cdot (\phi_{rd} \cdot I_{sq} - \phi_{rq} \cdot I_{sd}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega_r - p \cdot \frac{C_r}{J} \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} I_{sd} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{sq} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

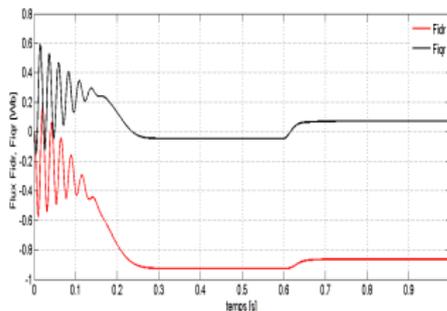
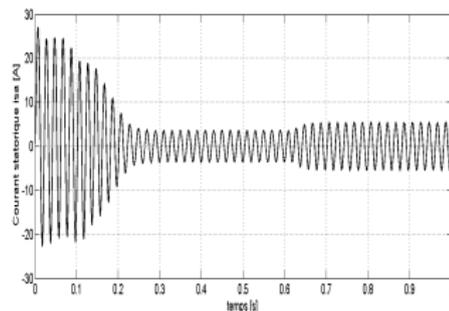
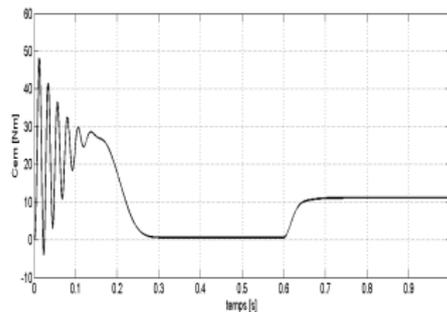
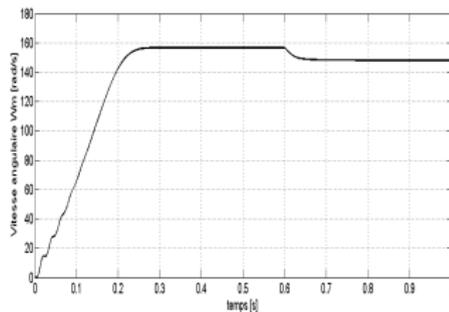
# Démarrage direct du MAS à vide

$U_N = 220/380V$ ,  $f = 50Hz$ ,  $P_N = 1.5kW$ ,  $n_N = 1420tr/min$ , couplage Y

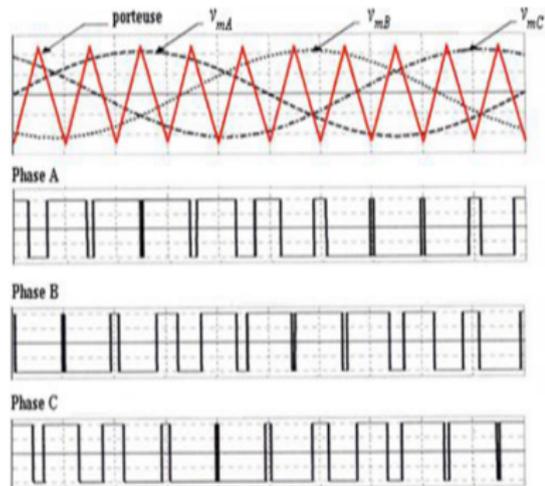
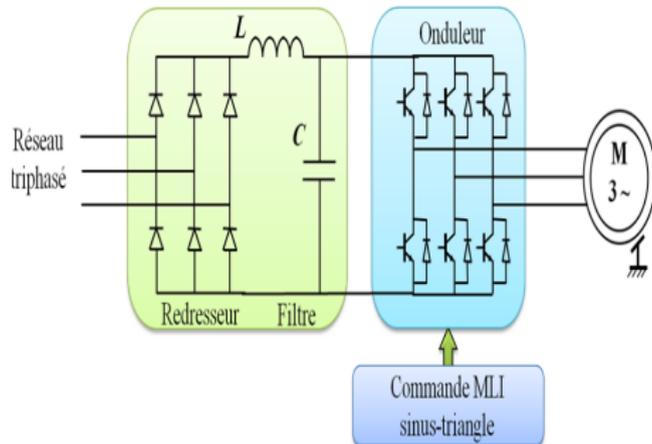


# Démarrage à vide avec application d'un échelon de couple

$$C_r = 10 \text{ Nm à } t = 0.6 \text{ s}$$

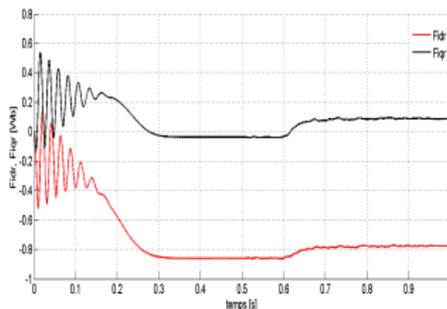
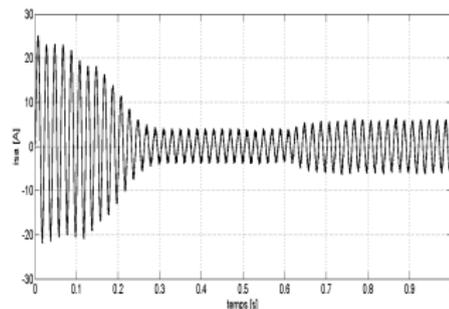
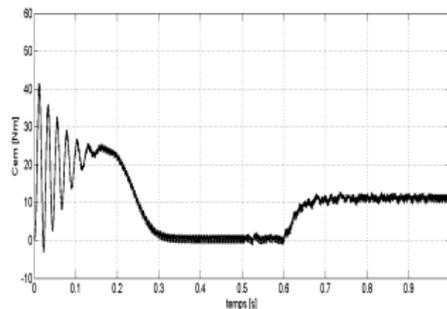
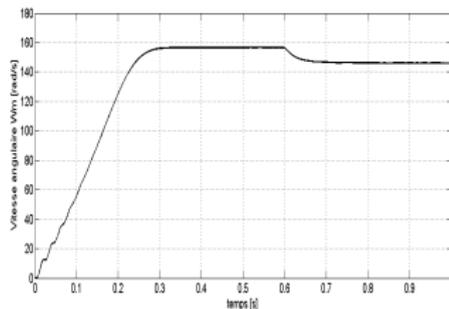


# Association Onduleur-MAS



# Démarrage à vide avec application d'un échelon de couple

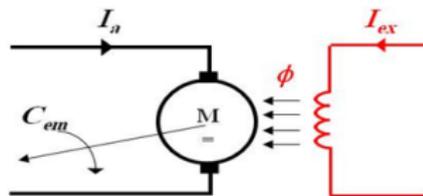
$$C_r = 10 \text{ Nm à } t = 0.6 \text{ s, } U_{CC} = 420 \text{ V, } m = 48, r = 0.85$$



# CHAPITRE II :

## Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

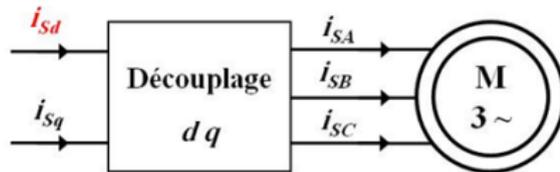
# Principe de la commande vectorielle



$$C_{em} = K_c \cdot I_a \cdot I_{ex}$$

Composante de couple

Composante de flux



$$C_{em} = K_c' \cdot i_{sq} \cdot i_{sd}$$

Composante de couple

Composante de flux

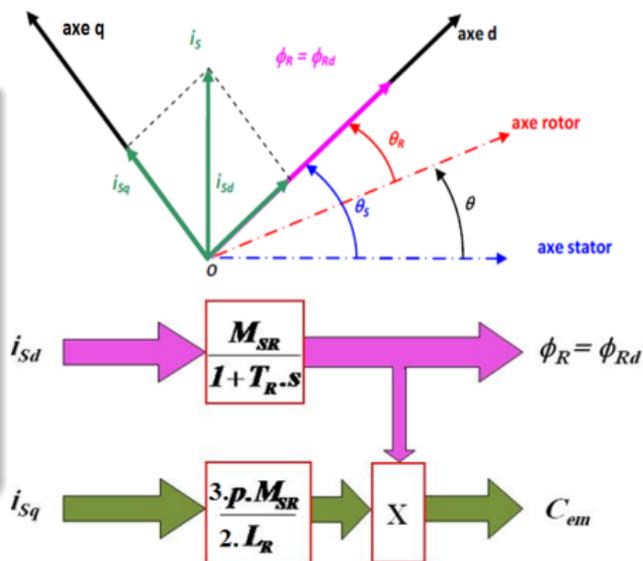
# Orientation du flux rotorique sur l'axe direct

$$\Rightarrow C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M_{Sr}}{L_r} \cdot (\phi_{rd} i_{Sq} - \phi_{rq} i_{Sd})$$

$$\Rightarrow \phi_r = \sqrt{\phi_{rd}^2 + \phi_{rq}^2}$$

$$\Rightarrow \phi_{rq} = 0 \text{ donc : } \phi_{rd} = \phi_r$$

$$\Rightarrow C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M_{Sr}}{L_r} \cdot \phi_r i_{Sq}$$



# Découplage par compensation

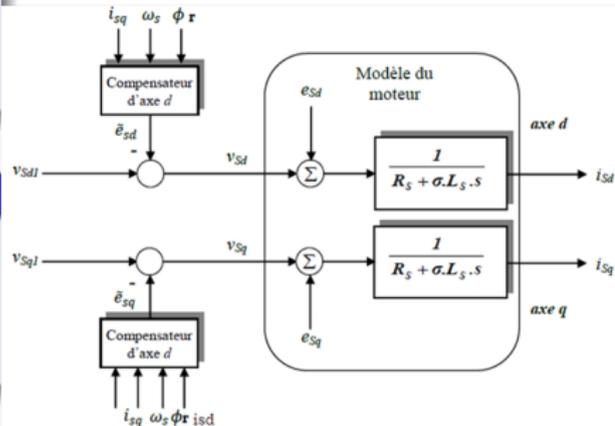
$fem(s)$  de compensation

$$\begin{cases} \tilde{e}_{sd} = +\omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{M_{Sr}}{L_r^2} \cdot R_r \phi_r \\ \tilde{e}_{sq} = -\omega_s \sigma L_s i_{sd} - \frac{M_{Sr}}{L_r} \cdot \omega \phi_r \end{cases}$$

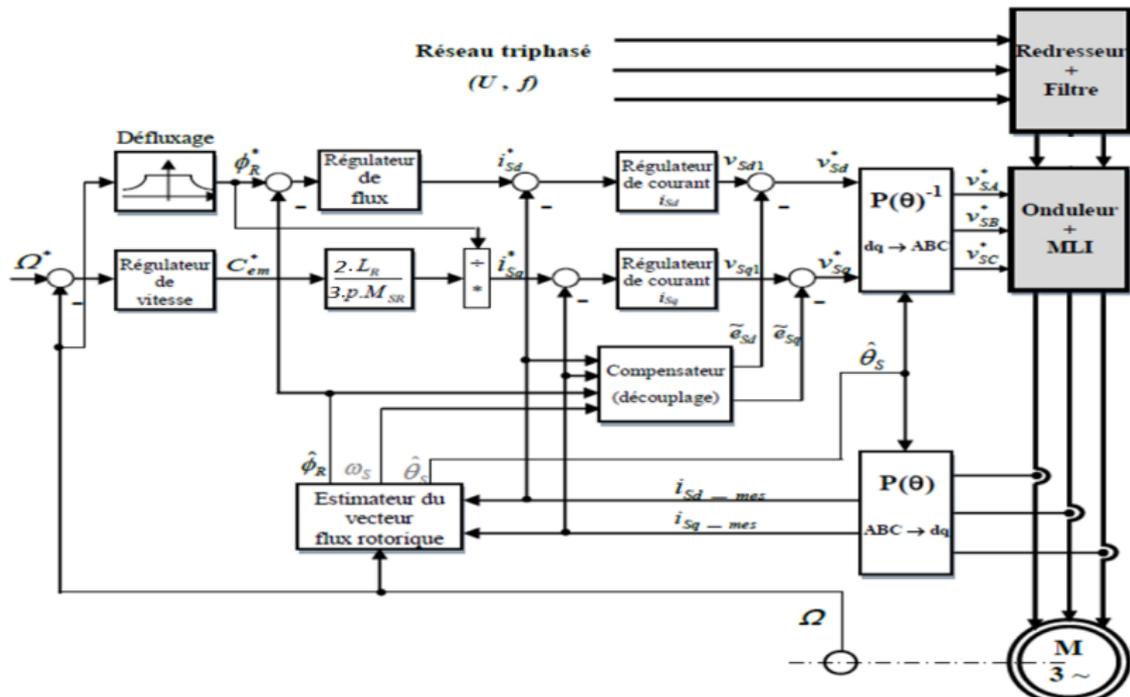
Nouveau système découplé

$$\begin{cases} V_{Sd1} = (R_s + R_r \frac{M_{Sr}}{L_r^2}) i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} \\ V_{Sq1} = (R_s + R_r \frac{M_{Sr}}{L_r^2}) i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{Sd1} - \tilde{e}_{sd} \\ V_{sq} = V_{Sq1} - \tilde{e}_{sq} \end{cases}$$

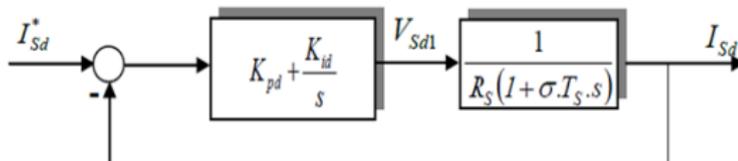


# Structure de la commande vectorielle directe

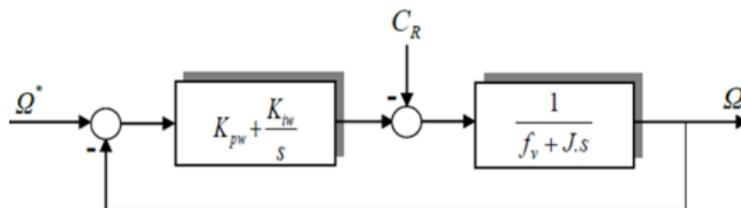


# Les différentes boucles de régulation

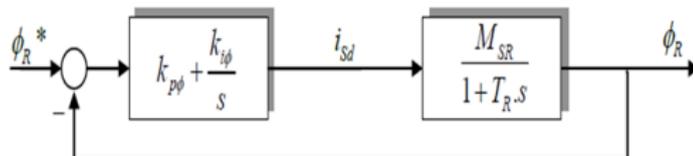
- Régulateurs PI de courant



- Régulateur PI de vitesse

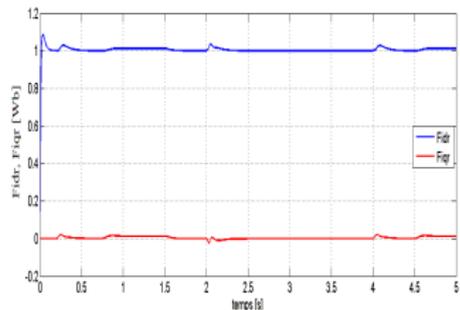
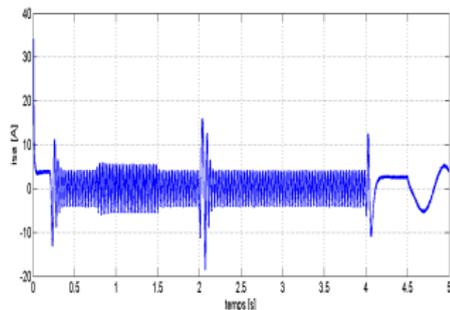
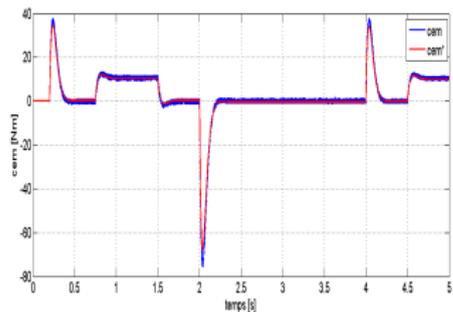
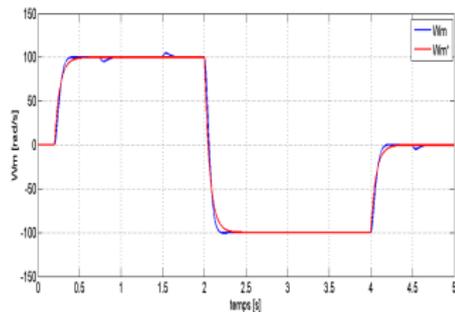


- Régulateur PI de flux



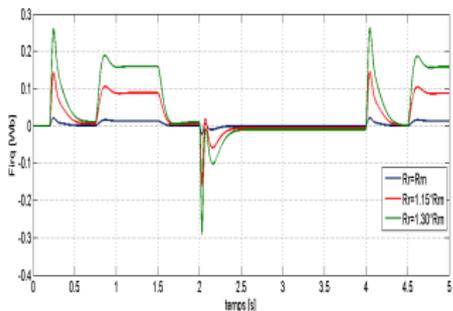
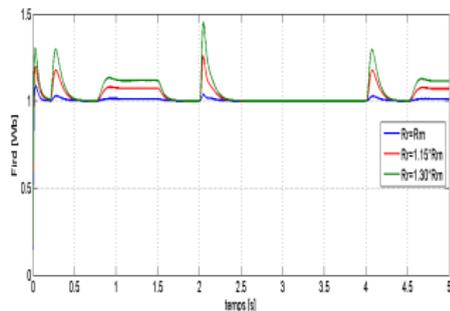
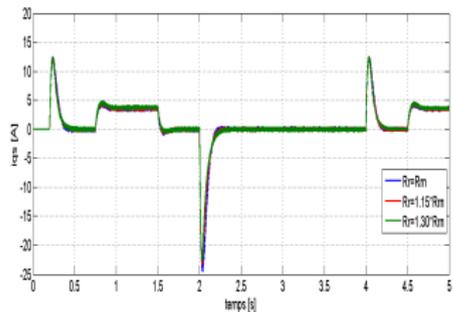
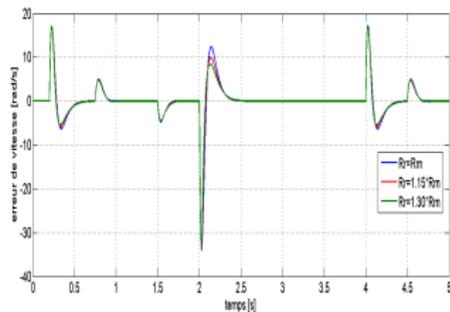
# Test de poursuite et de régulation

Application et suppression d'un couple de charge de  $C_r = 10 Nm$



# Test de robustesse vis-à-vis la variation de $R_r$

De 1, 1.15 et 1.30 de la valeur nominale



# Critique de la commande vectorielle

- Bon comportement statique et dynamique aussi bien en poursuite qu'en régulation.
  - Robustesse vis-à-vis les variations de  $R_r$  faible.
  - Perte de découplage pendant les régimes transitoires et en présence des perturbations de charges.
  - Faiblesse des régulateurs PI surtout celui de la vitesse.
- ⇒ D'où la nécessité de régulateurs plus robustes ou de commande plus performante

# CHAPITRE III :

## Commande à structure variable par mode de glissement

# Commande par mode glissant

## Système à structure variable

- Système dont la structure change pendant son fonctionnement.
- Caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation.

## Avantages

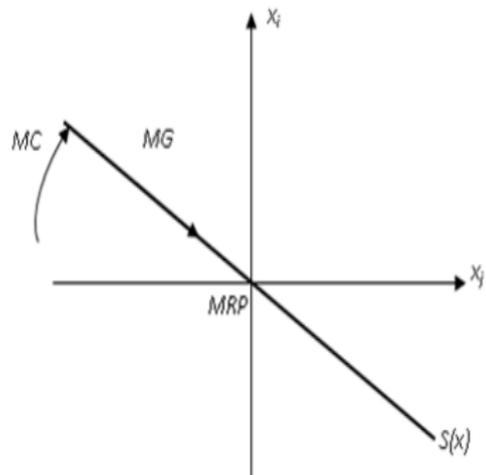
- Simplicité de mise en œuvre.
- Très bonne réponse dynamique.
- Robustes envers les incertitudes internes.
- Insensible aux variations paramétriques.

## Principe

- Ramener le trajectoire d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre.

# Les modes de la trajectoire

- Mode de convergence (MC)
- Mode de glissement (MG)
- Mode du régime permanent (MRP)



# Conception de la commande par mode de glissement

La mise en œuvre de cette commande nécessite principalement trois étapes :

⇒ Le choix de la surface :

$$S(x) = \left( \frac{\delta}{\delta t} + \lambda_x \right)^{r-1} \cdot e(x)$$

⇒ Conditions de convergence : (fonction de **Lyapunov**)

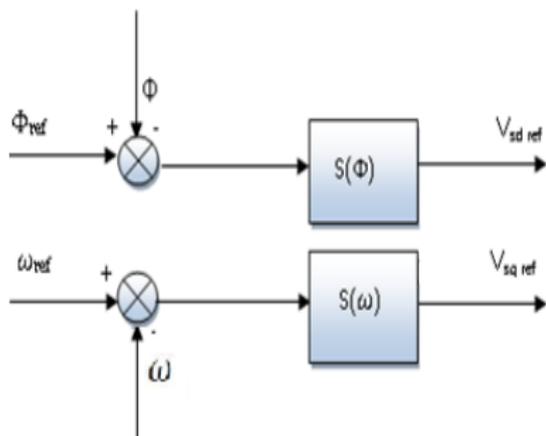
$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x)$$

⇒ Calcul de la commande :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N$$

# Structure de la commande par mode glissant

Afin de régler la vitesse de la MAS, deux surfaces de glissement sont choisies vu la dimension du vecteur de commande  $u$ .

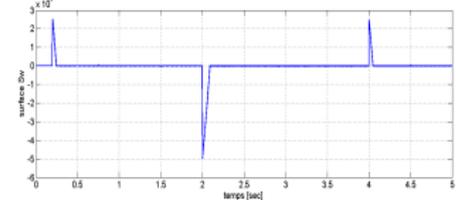
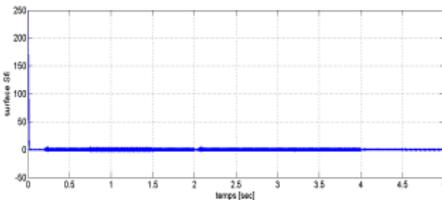
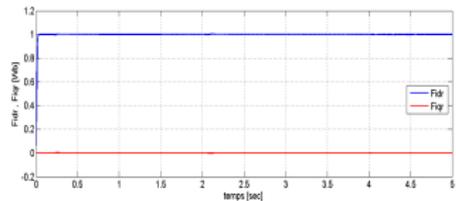
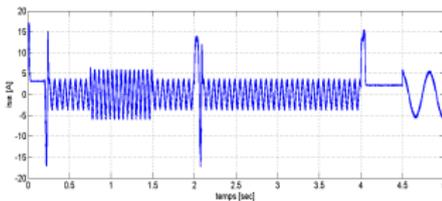
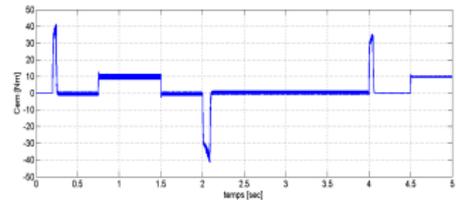
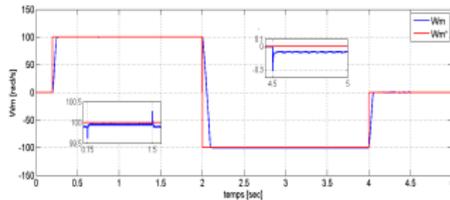


$$\begin{cases} S_{\phi_r} = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_{\phi_r} \right) e(\phi_r) \\ S_{\omega} = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_{\omega} \right) e(\omega) \end{cases}$$

- avec : 
$$\begin{cases} e(\phi_r) = \phi_r^* - \phi_r \\ e(\omega) = \omega^* - \omega \end{cases}$$

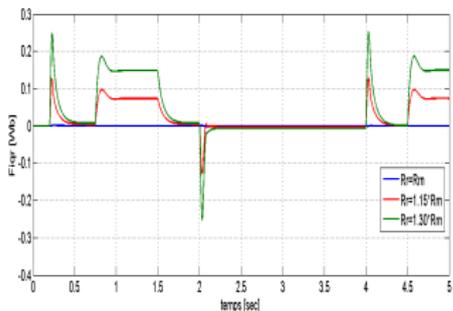
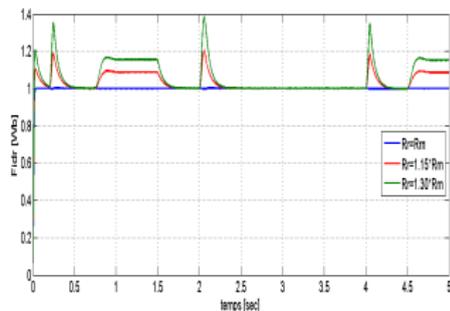
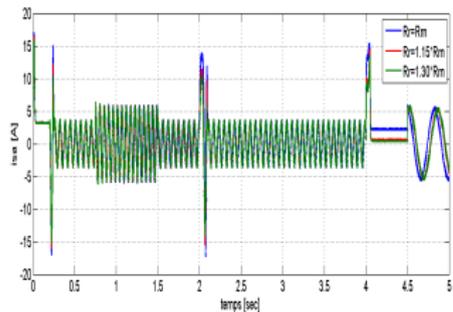
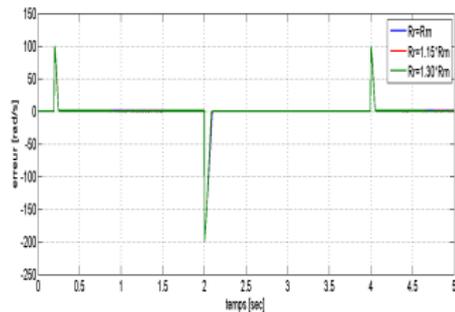
# Test de poursuite et de régulation

Application et suppression d'un  $C_r = 10Nm$



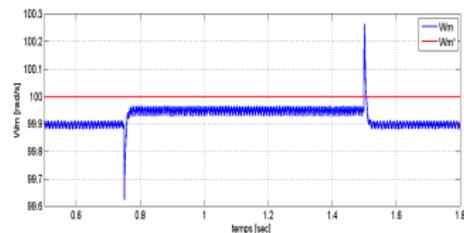
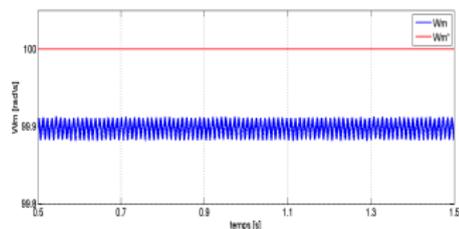
# Test de robustesse vis-à-vis la variation de $R_r$

De 1, 1.15 et 1.30 de la valeur nominale



# Phénomène de broutement "chattering"

- L'inconvénient de cette commande est le phénomène de broutement "chattering"



Il existe différentes méthodes pour réduire le broutement :

- Utilisation de fonction adoucie
- Ajout d'une intégration
- Mode glissant flou

# CHAPITRE IV :

## Commande sans capteur avec observateur de flux et de vitesse

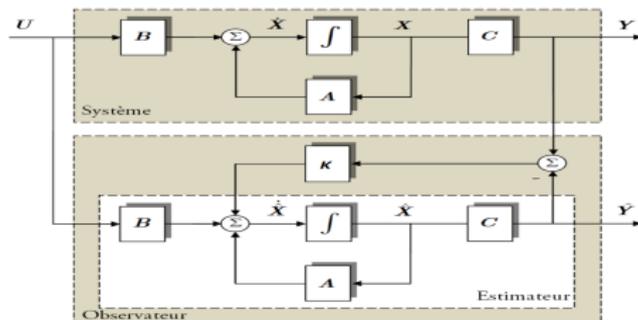
# Principe et objectif de l'observateur

## Principe

- Reconstituer les grandeurs non mesurables ou non accessibles à partir des mesures accessibles et mesurables du système.

## Objectif

- Reconstruire des grandeurs dont on ne peut ou ne désire pas mesurer l'état par une méthode directe.



# Modèle dynamique du moteur dans le repère $(\alpha, \beta)$

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

$$X = [I_{S\alpha} \ I_{S\beta} \ \phi_{r\alpha} \ \phi_{r\beta}]^T, \quad Y = I_S = [I_{S\alpha} \ I_{S\beta}]^T, \quad U = V_S = [V_{S\alpha} \ V_{S\beta}]^T$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_1 \\ a_4 & 0 \\ 0 & a_4 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} a_2 & a_3\omega \\ -a_3\omega & a_2 \\ a_5 & -\omega \\ \omega & a_5 \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_S} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_S} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = -\left(\frac{1}{T_S\sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r\sigma}\right), \quad a_2 = \frac{1-\sigma}{T_r L_m \sigma}, \quad a_3 = \frac{1-\sigma}{L_m \sigma}, \quad a_4 = \frac{L_m}{T_r}, \quad a_5 = -\frac{1}{T_r}$$

# Observateur de Luenberger

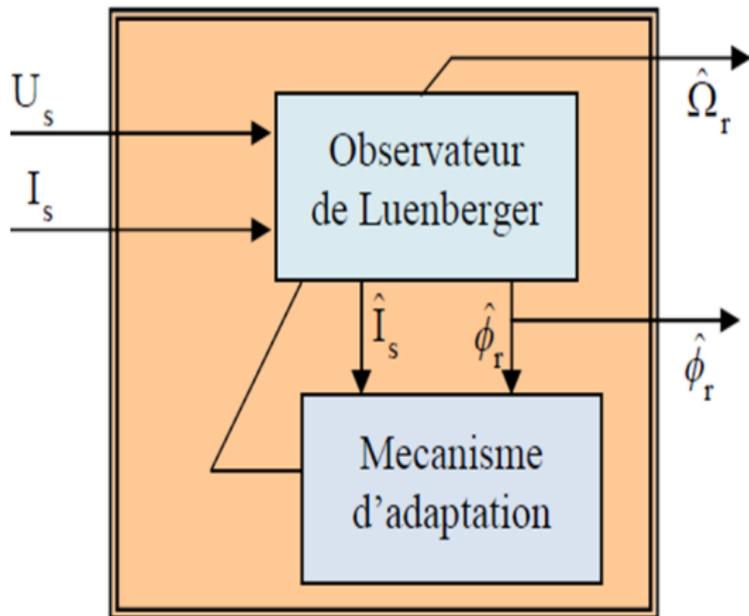
## Représentation d'état

$$\begin{cases} \hat{\dot{X}} = A(\Omega)\hat{X} + BU + K(I_S - \hat{I}_S) \\ \hat{Y} = C\hat{X} \end{cases}$$

avec :

- $A(\Omega) = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3\omega \\ 0 & a_1 & -a_3\omega & a_2 \\ a_4 & 0 & a_5 & -\omega \\ 0 & a_4 & \omega & a_5 \end{bmatrix}$
- $K = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 & K_4 \\ -K_2 & K_1 & -K_4 & K_3 \end{bmatrix}^T$
- $(I_S - \hat{I}_S) = [I_{S\alpha} - \hat{I}_{S\alpha} \quad I_{S\beta} - \hat{I}_{S\beta}]^T$

# Observateur adaptatif de vitesse KUBUTA



# Loi d'adaptation pour l'estimation de la vitesse

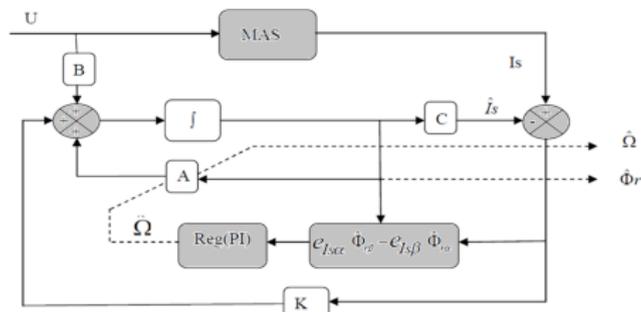
- La théorie de Lyapunov permet de définir la loi d'adaptation.

$$\hat{\Omega} = \lambda a_3 \int_0^t (e_{I_{S\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{S\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) dt$$

$$\text{avec : } \begin{cases} e_{I_{S\alpha}} = I_{S\alpha} - \hat{I}_{S\alpha} \\ e_{I_{S\beta}} = I_{S\beta} - \hat{I}_{S\beta} \end{cases}$$

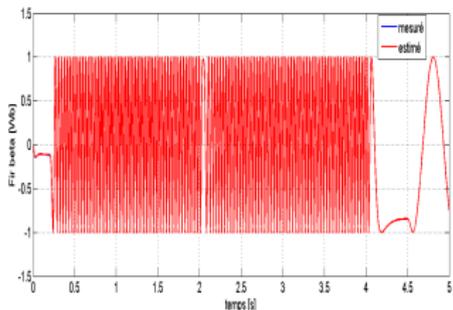
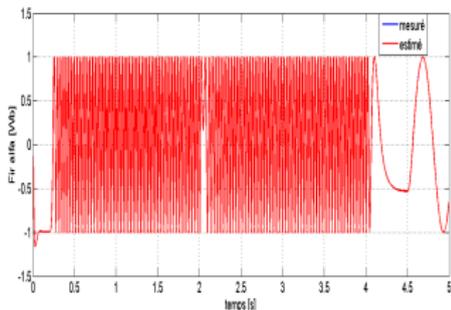
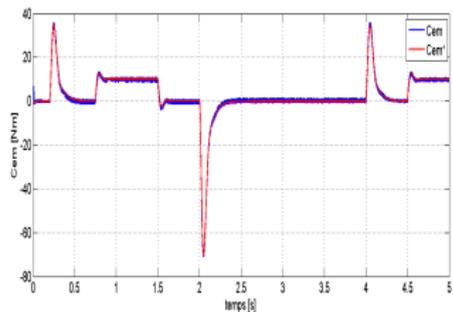
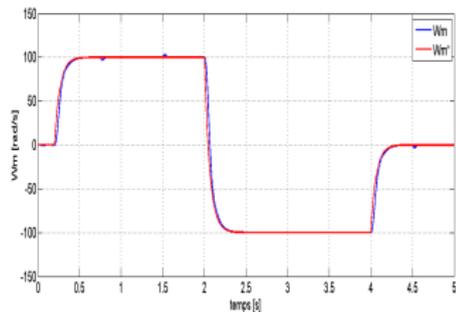
- Emploi d'un contrôleur de type PI minimise l'erreur.

$$\hat{\Omega} = k_p (e_{I_{S\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{S\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) + k_i \int (e_{I_{S\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{S\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) dt$$



# Test de la CVD avec observateur de flux

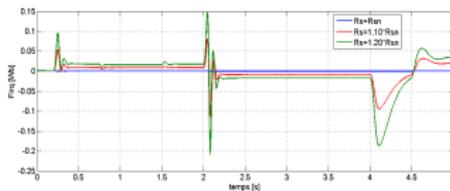
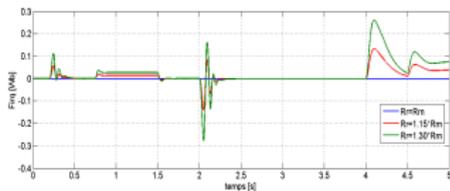
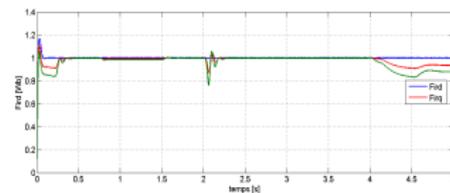
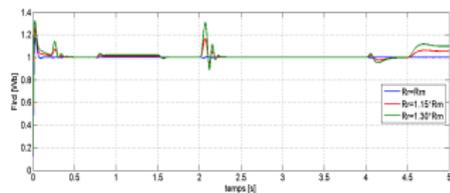
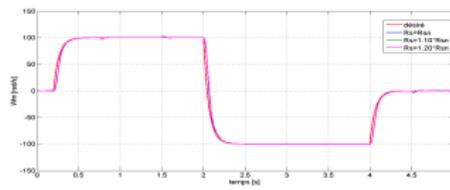
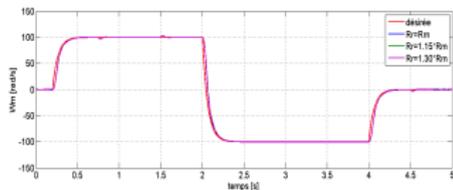
Application et suppression d'un couple de  $C_r = 10Nm$



# Test de robustesse de la CVD avec observateur de flux

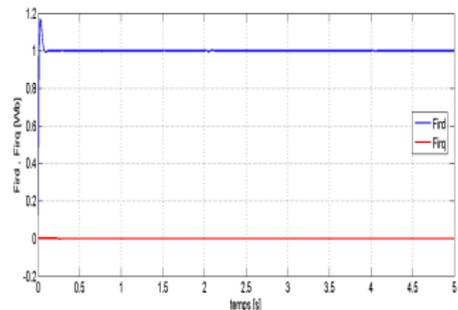
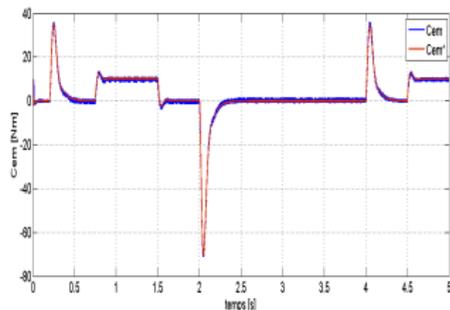
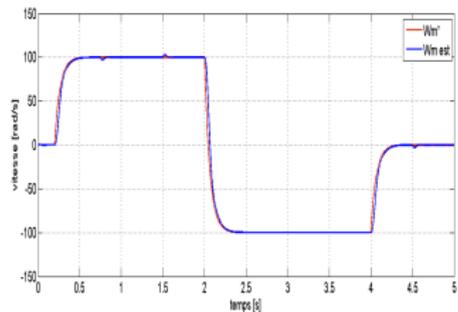
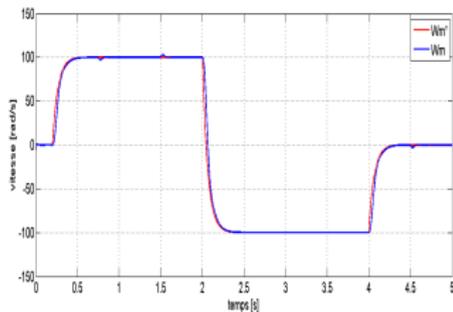
Variation de **1**, **1.15** et **1.30** de la valeur nominale de  $R_r$ .

Variation de **1**, **1.10** et **1.20** de la valeur nominale de  $R_s$ .



# Test de la CVD avec observateur adaptatif

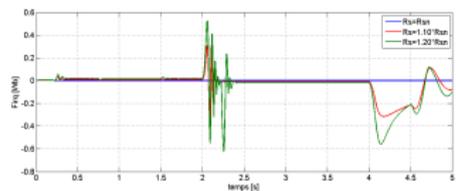
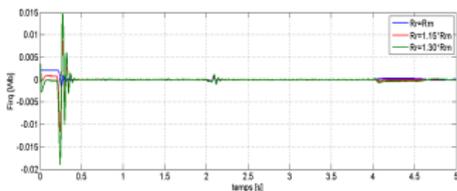
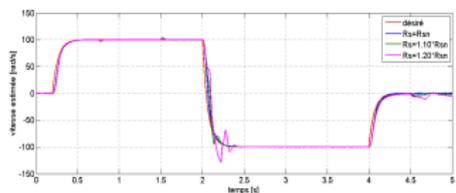
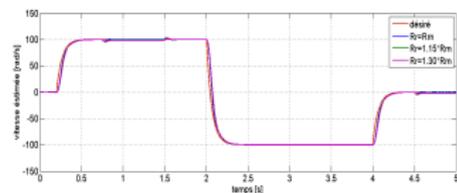
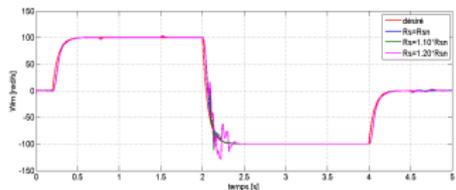
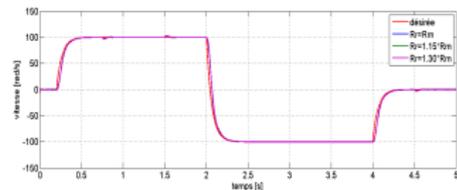
Application et suppression d'un couple de  $C_r = 10Nm$



# Test de robustesse de la CVD avec observateur adaptatif

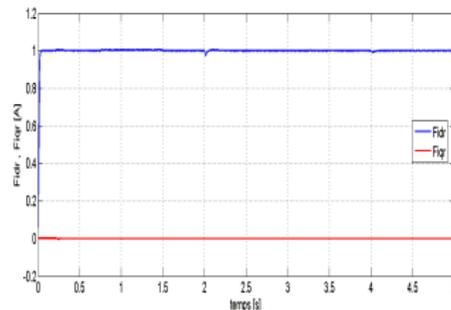
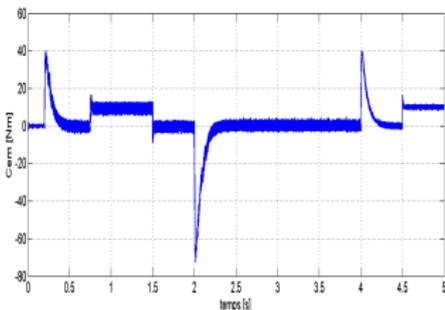
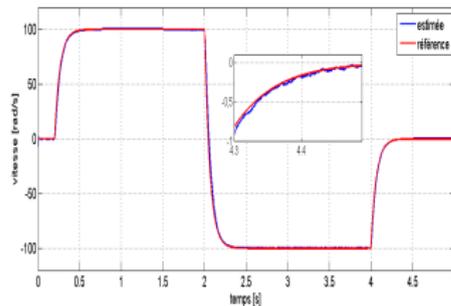
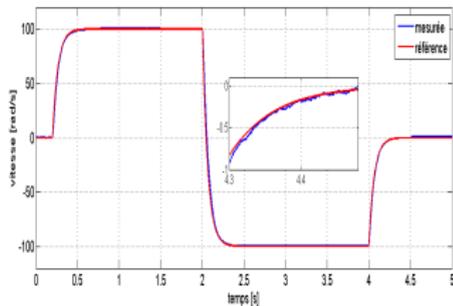
Variation de **1**, **1.15** et **1.30** de la valeur nominale de  $R_r$ .

Variation de **1**, **1.10** et **1.20** de la valeur nominale de  $R_s$ .



# Test de la SMC avec observateur adaptatif

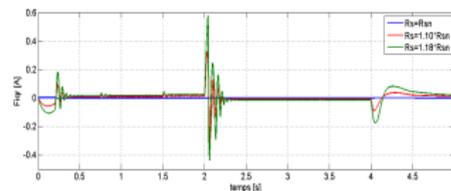
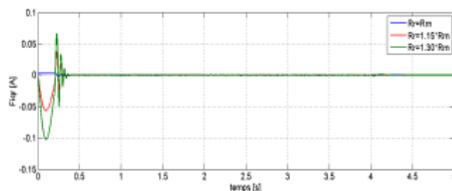
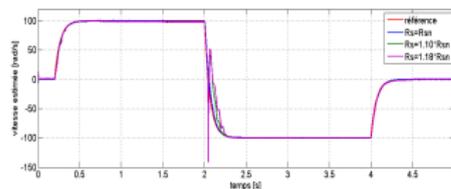
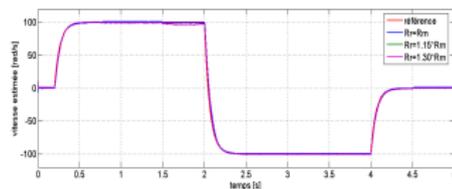
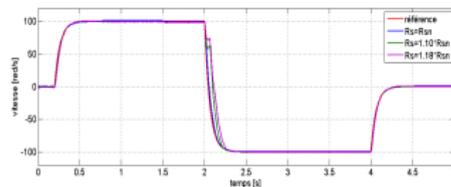
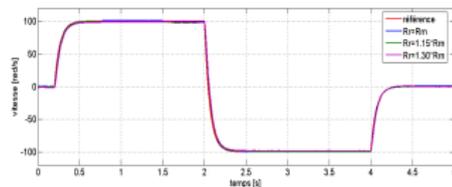
Application et suppression d'un couple de  $C_r = 10Nm$



# Test de robustesse de la SMC avec observateur adaptatif

Variation de **1**, **1.15** et **1.30** de la valeur nominale de  $R_r$ .

Variation de **1**, **1.10** et **1.18** de la valeur nominale de  $R_s$ .



# Conclusion

- La synthèse de la commande DFOC a permis de montrer ces bonnes performances en régime statique et dynamique. La sensibilité vis-à-vis la variation de  $R_r$  a été mise en évidence de même que la faiblesse des régulateurs PI.
- La commande à mode glissant mettant en œuvre une fonction adoucie a été réalisée ce qui a permis d'améliorer les performances dynamiques et la robustesse de l'entraînement. Les oscillations dûes au broutement ont été réduites mais la perte de découplage persiste lorsque  $R_r$  diminue.
- Deux observateurs ont été proposés pour l'estimation du flux et de la vitesse. Les deux algorithmes ont permis d'obtenir les estimations convergentes rapidement de manière précise. Les performances se sont détériorées à basse vitesse et lors des variations des résistances.

# Perspectives

- L'estimation de la résistance rotorique pour rétablir le découplage dans le cas des variations, par différentes techniques (Estimateur, MRAS, Logique Flou, Réseaux de Neurone, ...)
- L'estimation des résistances statoriques et rotoriques pour améliorer la convergence et la précision de l'observateur adaptatif
- La réduction du phénomène de broutement par l'insertion d'un bloc intégrateur et la recherche de nouvelles fonctions de commutation

## Références bibliographiques

**[BOS 01]** : B.K. BOSE, « Modern power electronics and AC drives », Condra Chair Of excellence in Power Electronics, The University Of Tennessee, Knoxville, United States Of America,2001.

**[BLA 72]** : BLASCHKE.F, The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed loop control system for rotating field machines. Siemens Review, Vol.34, pp.217-220, 1972.

**[SLO 91]** : SLOTINE.J. Applied non linear control3. Englewood Gliffs, NJ-Printice Hall, 1991.

**[KUB 94]** : H.KUBOTA, "Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Machines using Flux Observer" IEEE trans.Ind app. 1994.

# Merci de votre attention