



# Chapitre III

## III.1.INTRODUCTION :

La commande vectorielle de la machine à induction offre la possibilité d'atteindre de hautes performances en régime transitoire ou statique. Cela dépend de l'estimateur de la valeur du flux dans la machine et de son orientation influencée par les variations de la constante de temps rotorique en fonction des variations de la température. La mise en œuvre d'une adaptation en temps réel pour préserver les hautes performances de la commande est nécessaire. L'estimation des paramètres électriques d'une machine asynchrone au cours du fonctionnement du variateur de vitesse permet de réactualiser les données paramétriques du modèle de connaissance. Plusieurs méthodes d'estimateur de la résistance rotorique ou l'inverse de constante de temps rotorique ont été utilisées dans [5], [6] l'inverse de constante de temps rotorique a été estimée en se basant sur l'estimateur de la puissance réactive. [6]

Dans ce chapitre la constante de temps rotorique sera estimée en se basant sur des algorithmes de calcul nécessitant la connaissance des entrées électriquement mesurables aux bornes du stator.

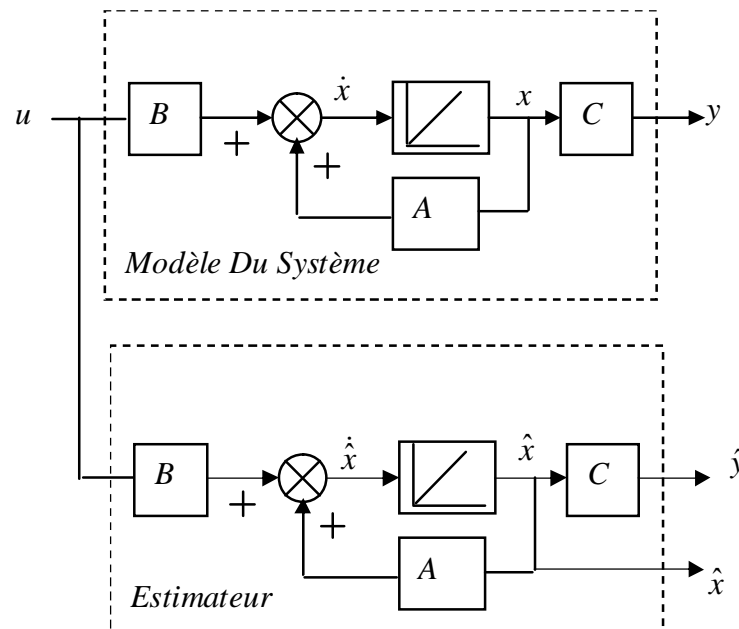
La méthode est basée initialement sur la détection des composants du flux rotorique dans le référentiel stationnaire biphasé. La résistance rotorique considérée en tant que paramètre inconnue est estimée par une relation additionnelle basée sur la théorie de Lyapunov;

### III-2 CONCEPTS D'ESTIMATEUR D'OBSERVATEUR:

Dans le domaine des entraînements à vitesse variable à motorisation asynchrone, les performances des lois de commande utilisées, dépendent du degré de précision dans la connaissance du modèle du flux et de sa position. Ces grandeurs sont difficilement accessibles par des mesures. En effet, les capteurs de flux sont relativement délicat (bruits de mesure) et réduisent la robustesse de l'ensemble. Ainsi, la reconstruction du flux ou de sa position par des estimateurs ou des observateur devient un objectif principal.

#### III-2.1 Estimateurs

Les estimateurs, utilisés en boucle ouverte, reposent sur l'utilisation d'une copie du modèle d'une représentation de la machine en régime permanent (estimateur statique) qu'en transitoire (estimateur dynamique). La dynamique d'un estimateur dépend des modes propres de la machine. Une telle approche conduit à la mise en œuvre d'algorithmes simples et rapides, mais sensibles aux erreurs de modélisation et aux variations paramétriques à la cour de fonctionnement [5]. En effet, il n'y a aucun bouclage avec de grandeurs réelles permettant de prendre en compte ces erreurs ou perturbations. Un tel estimateur est représenté sur la *fig (III-1)*:



**Fig(III-1) Schéma De Principe D'un Estimateur;**

Le modèle mathématique du moteur asynchrone, pris comme un système linéaire variant dans le temps, est donnée par:

$$\dot{x} = A(\omega)x + Bu; \quad (III-1)$$

$$y = Cx; \quad (III-2)$$

**B** est la matrice d'entrée du système, **C** est la matrice de sortie, et  $A(\omega)$  est la matrice de transition non stationnaire dans le cas de la machine à induction, puisqu'elle dépend de la vitesse rotation du moteur. Toutefois, elle peut être considérée comme quasi stationnaire vu la dynamique de la vitesse par rapport à celle des grandeurs électriques. En intégrant (III-1), on peut reconstruire les états à estimer.

$$\dot{x} = \int (\hat{A}(\omega)\hat{x} + \hat{B}u)dt; \quad (III-3)$$

Pour évaluer la précision de l'estimation, on considère l'écart entre les états réels et estimés, donné par:

$$\varepsilon = x - \hat{x} \quad (III-4)$$

Alors, la dynamique de l'erreur est déduite de la soustraction de (III-1) et (III-3)

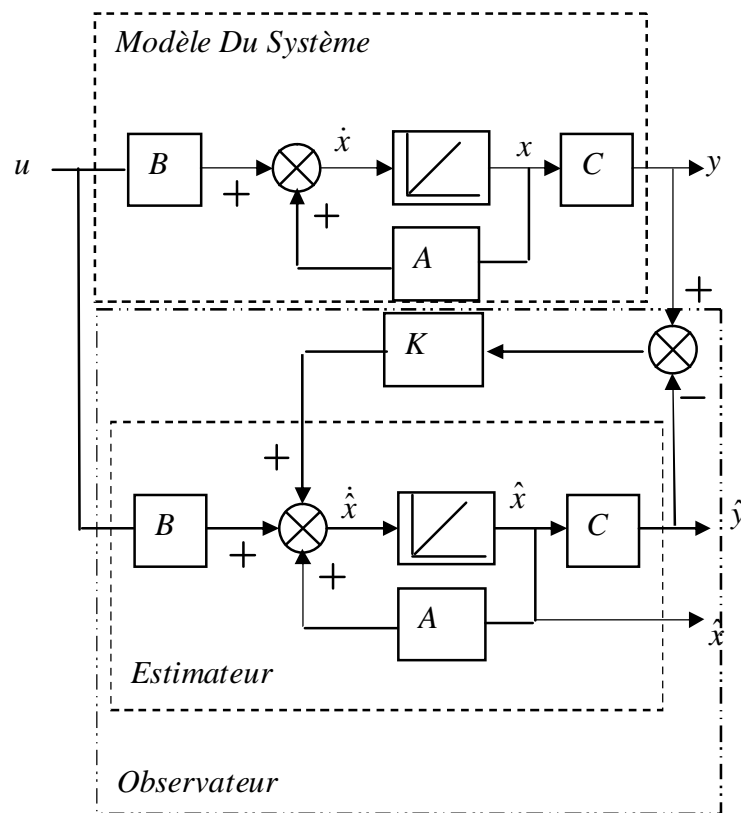
$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= A(\omega)\varepsilon + \Delta A\hat{x} + \Delta Bu \\ \text{Ou } \Delta A &= A(\omega) - \hat{A}(\omega) \text{ et } \Delta B = B - \hat{B} \end{aligned} \quad (III-5)$$

La vitesse de convergence de l'erreur d'estimation dépend des constantes de temps de système. Elle est vérifiée dans le cas où les valeurs propres de la matrice  $A(\omega)$  sont définies négatives (en considérant  $\Delta A = 0$  et  $\Delta B = 0$ ). Lorsque des erreurs de modélisation existent, les termes  $\Delta A\hat{x}$  et  $\Delta Bu$  se comportent comme des entrées dans l'équation différentielle (III-5) et par conséquent les estimées  $\hat{x}$  seront biaisées. Dans le cas de la machine à induction, on ne maîtrise pas le temps de convergence de l'erreur d'estimation et les estimés auront forcément une erreur statique due aux erreurs de modélisation.

Les inconvénients de l'estimateur peuvent être atténués en utilisant un terme correcteur. Ainsi l'écart entre la mesure et son estimée est introduit dans l'équation de l'estimateur à travers une matrice de gain de correction **K**, c'est ce qu'on entend par observateur.

### III-2.2 Observateur:

Un observateur est un estimateur fonctionnant en boucle fermée et disposant d'une dynamique indépendant du système. Il fournit une estimation d'une grandeur physique interne d'un système donnée, en se fondant uniquement sur des informations concernant les entrées et les sorties estimées et les sorties réelles, à l'aide de la matrice gain  $K$  pour régler ainsi la dynamique de convergence de l'erreur **fig (III-2)**:



**Fig(III-2) Schéma De Principe D'un Observateur;**

Le principe de construction d'un observateur consiste donc à corriger la dynamique de l'estimation dans l'équation (III-3) en tenant compte de l'écart entre la sortie réelle et la sortie reconstruite. Cela conduit à l'observateur suivant:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}(\omega)\hat{x} + \hat{B}u + K(Cx - \hat{C}\hat{x}) \quad (\text{III-6})$$

Où K est matrice gaine de l'observateur;

On définit comme erreur de mesure l'écart entre les grandeurs mesurées et leurs estimées. De la même façon que pour l'estimateur, l'équation décrivant le comportement de l'erreur d'estimation est obtenu en soustrayant (III-6) et (III-1). Alors, l'équation de l'erreur d'estimation devient:

$$\dot{\varepsilon} = [A(\omega) - KC]\varepsilon + [\Delta A - K\Delta C]\hat{x} + \Delta Bu \quad (\text{III-7})$$

Le principal avantage de l'observateur devant l'estimateur peut être facilement montré par la dernière équation. En effet, la dynamique de convergence de l'erreur vers zéro est contrôlée par le terme  $[A(\omega) - KC]$  comportant la matrice de gaine de correction K. on peut alors imposer la dynamique désirée par le choix de la matrice de gain de correction (dynamique indépendante), et compenser partiellement les erreurs de modélisation. Cependant, trouver le compromis entre vitesse de convergence et compensation d'une erreur de modélisation n'est pas toujours aisée [5]. on fait alors appel aux techniques d'adaptation ou d'identification paramétrique.

### III-3 METHODES D'ESTIMATION DE LA RESISTANCE ROTORIQUE:

Les phénomènes thermiques représentent un problème très important pour assurer le bon fonctionnement du variateur électrique. Il s'agit des échauffements des différentes parties de la machine. Ces échauffements doivent être contrôlés afin de garantir un fonctionnement fiable du variateur. D'un autre côté la variation de la température modifie d'une manière importante les résistances statoriques  $R_s$  et rotorique  $R_r$ . Ceci remet en cause la validité du modèle d'action, défini en principe pour la température stationnaire [7] les conséquences d'une erreur d'orientation du référentiel suite à un écart entre le paramètre réel de la machine

$R_r$  et celui estimé dans la commande  $\hat{R}_r$  sont essentiellement de deux natures, les erreurs statiques sur le flux et le couple en régime établi et les oscillations amorties sur le flux et le couple en régime transitoire. Les méthodes d'estimation proposées dans la littérature peuvent être décomposées en deux familles, les méthodes d'identification et les méthodes de correction.

Les méthodes d'identification sont basées sur l'identification analytique, l'injection de signaux et celles basées sur les algorithmes d'identification comme le filtre de kalman, la logique floue ou les réseaux de neurones. La principale difficulté dans ce cas vient du fait que la forme des signaux d'entrée /sortie (régime transitoire et permanent) n'est plus maîtrisée. Ils sont généralement imposés par la commande elle – même.

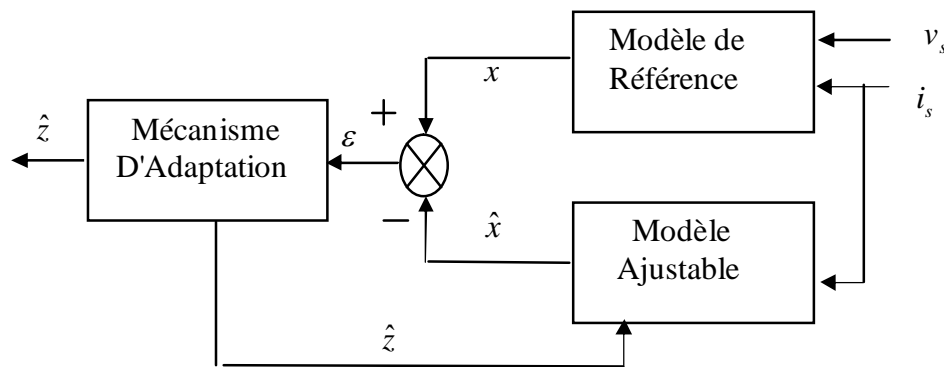
Les méthodes de correction sont basées sur la recherche d'une fonction erreur dont l'évolution est liée à la différence entre  $R_r$  effective et  $\hat{R}_r$  utilisée dans la commande. Cette erreur représente la différence entre la valeur d'une grandeur obtenue à partir des informations fournies par la commande et celle déterminée à partir des mesures. Cette grandeur peut être la f.e.m induite au stator, le flux rotorique ou la puissance réactive.

L'avantage de ces méthodes, étant leur indépendance vis-à-vis des variations de la résistance statorique dont l'évolution pourrait perturber l'erreur paramétrique. Puisque les courants, tensions sont mesurable, nous sommes intéressés à ces méthodes indirectes plus

Précisément l'utilisation de l'estimation du flux rotorique pour générer l'estimation de  $R_r$  et l'estimation de la constant de temps rotorique  $\frac{1}{T_r}$  en tenant compte uniquement de la variation de  $R_r$ .

#### III-4.SYSTEME ADAPTATIF AVEC MODELE DE REFERANCE MRAS:

L'approche par le système adaptatif avec modèle référence MRAS à été proposée par Schauder [8], elle est basée sur l'identification adaptative avec modèle de référence pour estimer la vitesse. Sous sa forme simple, la structure MRAS comme présentée par le **fig (III-2)**, se compose de deux estimateurs qui calculent les mêmes grandeurs de moteur, le premier est un modèle de référence que constituant le moteur asynchrone et le deuxième constitue le système adaptatif. La différence entre les sorties des deux estimateurs est utilisée pour corriger l'estimation.



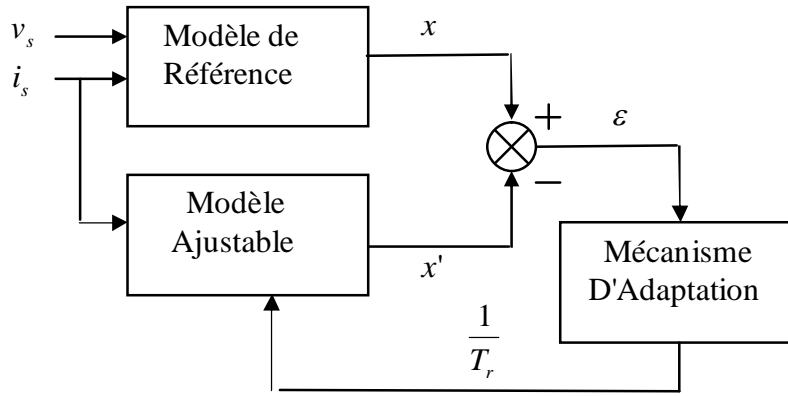
**Fig (III-3) Structure De MRAS Générale;**

Plusieurs structures de MRAS sont dénombrées selon le choix de la variable  $\mathbf{x}$ , tels que le flux rotorique, la force électromotrice ou la puissance réactive.

Comparée à d'autres approches, la technique MRAS, permet d'améliorer les performances de l'estimation de vitesse qui peuvent s'étendre à très basse vitesse. Toutefois, elles ne peuvent toujours pas travailler à très basses fréquences statorique. Dans les structures adaptatives, les paramètres de la matrice de rétroaction du système non linéaire influence considérablement, le taux de convergence du mécanisme adaptatif, qui n'est pas une tâche facile, particulièrement dans des conditions variables de fonctionnement.

### III-5 ESTIMATION DE LA CONSTANTE DE TEMPS ROTORIQUE PAR LA TECHNIQUE MRAS:

La technique adaptative basée sur le modèle de référence MRAS a été utilisée pour l'estimation du flux rotorique et de la constante de temps rotorique en utilisant uniquement les mesures de la tension et du courant statorique. Comme le montre le schéma de la **fig (III-4)**, cette méthode est basée sur deux modèles pour l'estimation du flux rotorique. Le premier modèle de référence ne dépendant pas de la constante de temps rotorique, fournit le flux rotorique. Le deuxième modèle ajustable, qui est directement dépendant de la constante de temps rotorique, fournit le flux rotorique estimé. L'erreur entre ces deux modèles injectée dans un mécanisme d'adaptation donne une estimation de la constante de temps rotorique.



**Fig (III-4) Structure De MRAS Estime ;**

### III-5.1 Modèle D'état:

Le modèle de la machine de rapière  $(\alpha, \beta)$  lie au stator pour un vecteur d'état  $[x] = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \phi_{r\alpha} \ \phi_{r\beta}]^T$  et de tension de commande  $[U] = [U_{s\alpha} \ U_{s\beta}]^T$  en tenant compte que le rotor de la machine à induction est un court circuit est exprimé par :

$$\begin{cases} V_s = (R_s - \sigma L_s p) i_s + \frac{M}{L_r} p \phi_r \\ 0 = -\frac{M}{T_r} i_s + \left( \frac{1}{T_r} + p - j\omega \right) \phi_r \end{cases} \quad (III-6)$$

Avec  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  constante du temps rotorique;

Le flux rotorique provenant de la première équation du système (III-6) ne dépend pas de la constante de temps rotorique et produit la valeur de référence du flux rotorique, elle peut être considérée comme modèle de référence tandis que la deuxième équation qui dépend de la constante de temps rotorique produit la valeur estimée du flux rotorique peut être considérée comme modèle ajustable. L'erreur entre ces deux modèles injectée dans un mécanisme d'adaptation dont la structure sera donnée par la suite, donne la constante de temps rotorique. La stabilité globale de cet algorithme est démontrée par le critère d'hyper stabilité de POPOV.



Soient  $\bar{\phi}_r$  et  $\frac{1}{T_r}$  les quantités estimées de  $\bar{\phi}_r$  et  $\frac{1}{T_r}$  respectivement. A partir de la deuxième équation de (III-6) on pourra définir un simple estimateur de flux par:

$$\dot{\bar{\phi}}_r = \left( -\frac{1}{T_r} + j\omega \right) \bar{\phi}_r + \frac{M}{T_r} \bar{i}_s \quad (III-7)$$

On peut définir alors une erreur vectorielle  $\bar{\varepsilon} = \bar{\phi}_r - \hat{\bar{\phi}}_r$  donnée par:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \left( -\frac{1}{T_r} + j\omega \right) \bar{\varepsilon} + \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{\hat{T}_r} \right) (M \bar{i}_s - \bar{\phi}_r) \quad (III-8)$$

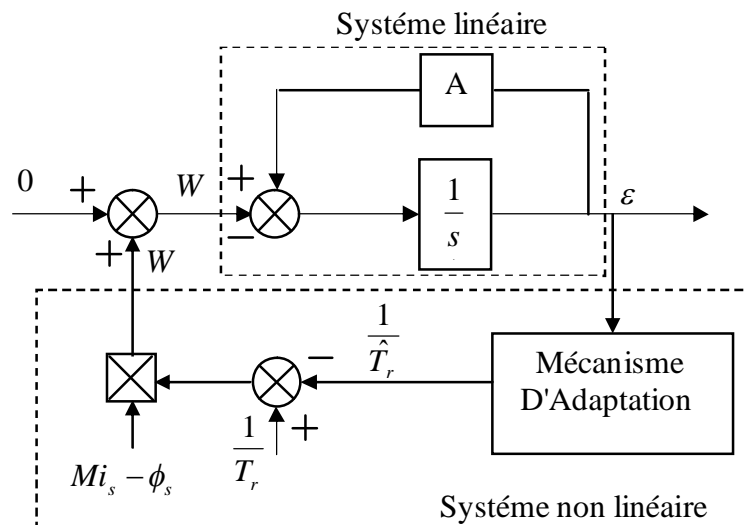
La stabilité de (III-8) exige naturellement la convergence de l'erreur  $\bar{\varepsilon}$  et la  $\left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{\hat{T}_r} \right)$  vers

zéro. Or la dérivée de l'erreur est composée de deux termes, dont le premier est relié directement à l'erreur du flux et peut être défini comme un système linéaire, le second terme est relié à l'erreur de l'inverse de la constante de temps et qui est un système non linéaire, cela est illustré dans la **fig (III-4)**. L'équation correspondante est donné par:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = [A] \bar{\varepsilon} - [W] \quad (III-9)$$

Avec:

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, [W] = \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{\hat{T}_r} \right) (\bar{\phi}_r - M \bar{i}_s)$$



Fig(III-5) Bloc Diagramme De La MRAS

La matrice  $[A]$  peut être considérée comme le pole complexe de l'évolution de l'erreur du système linéaire. Or ce pole est à partie réelle négative, alors ce système est stable. La deuxième partie de l'équation (III-8) doit également tendre vers zéro si non vers une quantité à énergie minimale tout en incluant le mécanisme d'adaptation qui doit satisfaire le critère d'hyper stabilité de Popov tel que on a:

$$\int \varepsilon^T W dt \geq -y^2 \quad \forall t \geq 0 \quad (III-10)$$

Schauder propose la loi d'adaptation suivante :

$$\frac{1}{\hat{T}_r} = Q_2(\varepsilon) + \int_0^t Q_1(\varepsilon) d\tau \quad (III-11)$$

En utilisant l'équation (III-10) de  $\frac{1}{T_r}$  tout en remplaçant  $\varepsilon$  et  $W$  par leurs valeurs dans (III-

11), on obtient:

$$\int_0^t \left\{ [\varepsilon]^T [\phi_r - M i_s] \left[ \frac{1}{T_r} - Q_2(\varepsilon) - \int_0^t Q_1(\varepsilon) d\tau \right] \right\} dt \geq -\gamma^2 \quad (III-12)$$

Avec :

$$[x] = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ tel que } x = \varepsilon \text{ où } x = \phi_r - M i_s$$

La solution de cette équation peut être trouvée à l'aide de la relation suivante :

$$\int_0^t K \left( \frac{d f(t)}{dt} \right) f(t) dt \geq -\frac{1}{2} K f(0)^2, K > 0 \quad (III-13)$$

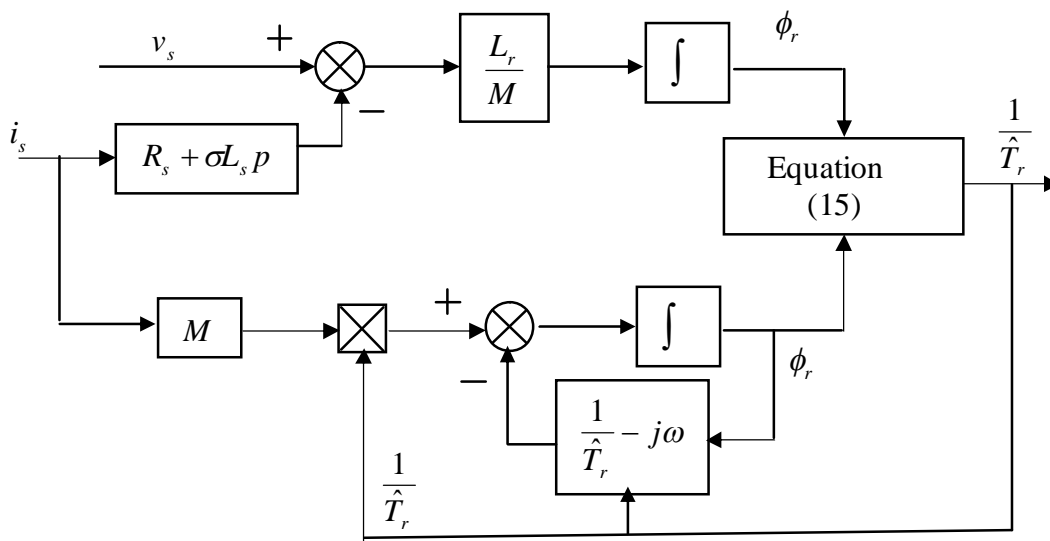
En utilisant cette dernière expression pour la résolution de l'inégalité de Popov (III-13) on obtient les fonctions suivantes :

$$\begin{cases} Q_1 = K_i ([\varepsilon]^T [M i_s - \phi_r]) \\ Q_2 = K_p ([\varepsilon]^T [M i_s - \phi_r]) \end{cases} \quad (III-14)$$

En remplaçant (III-14) dans l'équation (III-11), on obtient la valeur estimée  $\frac{1}{T_r}$  donnée par la loi d'adaptation suivante :

$$\frac{1}{\hat{T}_r} = K_p (\varepsilon_\alpha (M i_{s\alpha} - \phi_{r\alpha}) + \varepsilon_\beta (M i_{s\beta} - \phi_{r\beta})) + K_i \int_0^t (\varepsilon_\alpha (M i_{s\alpha} - \phi_{r\alpha}) + \varepsilon_\beta (M i_{s\beta} - \phi_{r\beta})) d\tau \quad (III-15)$$

Ce qui conduit tout simplement à utiliser un PI comme mécanisme d'adaptation. Le schéma Bloc correspondant, est donnée par la figure suivante :



**Fig (III-6)** Schéma Fonctionnel De La MRAS Basé Sur L'estimation De L'inverse De La Constant De Temps Rotorique

### III.6 ESTIMATION DE PULSATION STATORIQUE:

L'estimation de la constante de temps rotorique par la technique MRAS fournit la position de flux du rotor nécessaire pour l'orientation du flux. L'amplitude du flux est utilisée pour la boucle de régulation du flux et sa position est utilisée pour donner une estimation de la pulsation statorique.

$$\hat{\omega}_s = \frac{d}{dt} (\hat{\theta}) = \frac{d}{dt} \left[ \arctg \left( \frac{\hat{\phi}_{s\beta}}{\hat{\phi}_{s\alpha}} \right) \right] \quad (III-15)$$

Le calcul analytique de la dérivée donne:

$$\hat{\omega}_s = \frac{(V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha})\hat{\phi}_{s\beta} - (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta})\hat{\phi}_{s\alpha}}{\hat{\phi}_{s\alpha}^2 + \hat{\phi}_{s\beta}^2} \quad (III-16)$$

La valeur estimée de la pulsation de glissement nécessaire pour l'orientation du flux rotorique de la machine à induction est donnée par :

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_s - \omega \quad (III-17)$$

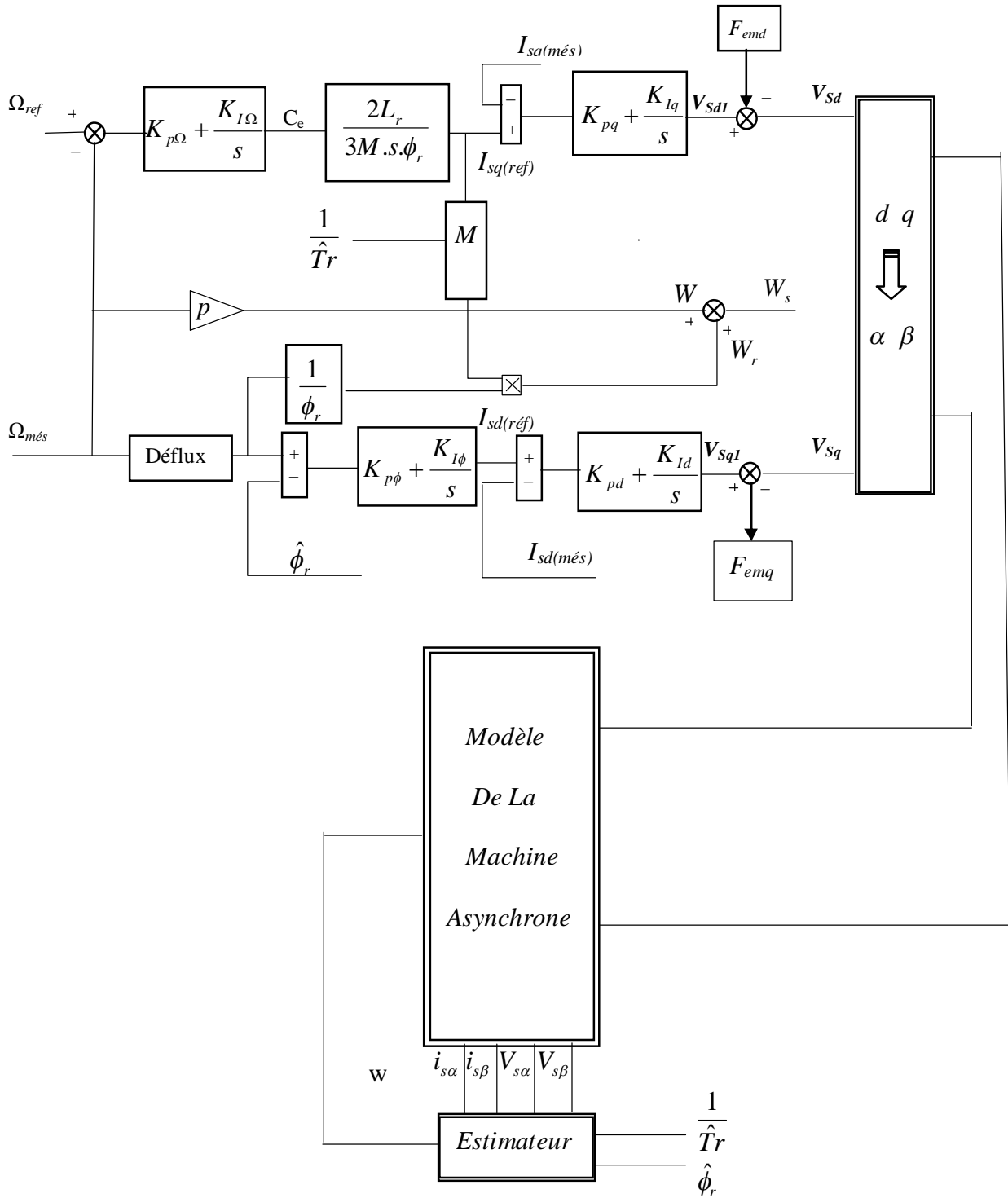
La constant de temps rotorique par la technique MRAS doit être utilisée pour garantir l'orientation du flux rotorique. La **Fig (III-7)** schématise le principe de la commande vectorielle du moteur à induction quand l'inverse de la constante de temps rotorique est estimé par la technique MRAS, à partir de la mesure des grandeurs électriques tels que les courants et les tensions statorique.

### III-7 RESULTATS DE SIMULATION DE LA MAS AVEC ASSOCIATION DE L'ESTIMATEUR

Les résultats des simulations suivantes ont été obtenus dans la **fig (III-7)** représenté le schéma de simulation de modèle de la machine asynchrone et l'estimateur;

Les tests qu'on effectue pour valider notre estimateur sont:

- ✚ Simulation avec variation de la résistance rotorique et avec la variation de la vitesse;
- ✚ Simulation avec variation de la résistance rotorique et avec l'inversion de la vitesse;
- ✚ Simulation avec variation de la résistance rotorique et avec variation de la charge;
- ✚ Test de robustesse pour la variation de la résistance rotorique;



**Fig(III-7) Schéma De Simulation Du Modèle De La Machine Asynchrone Et L'estimateur**

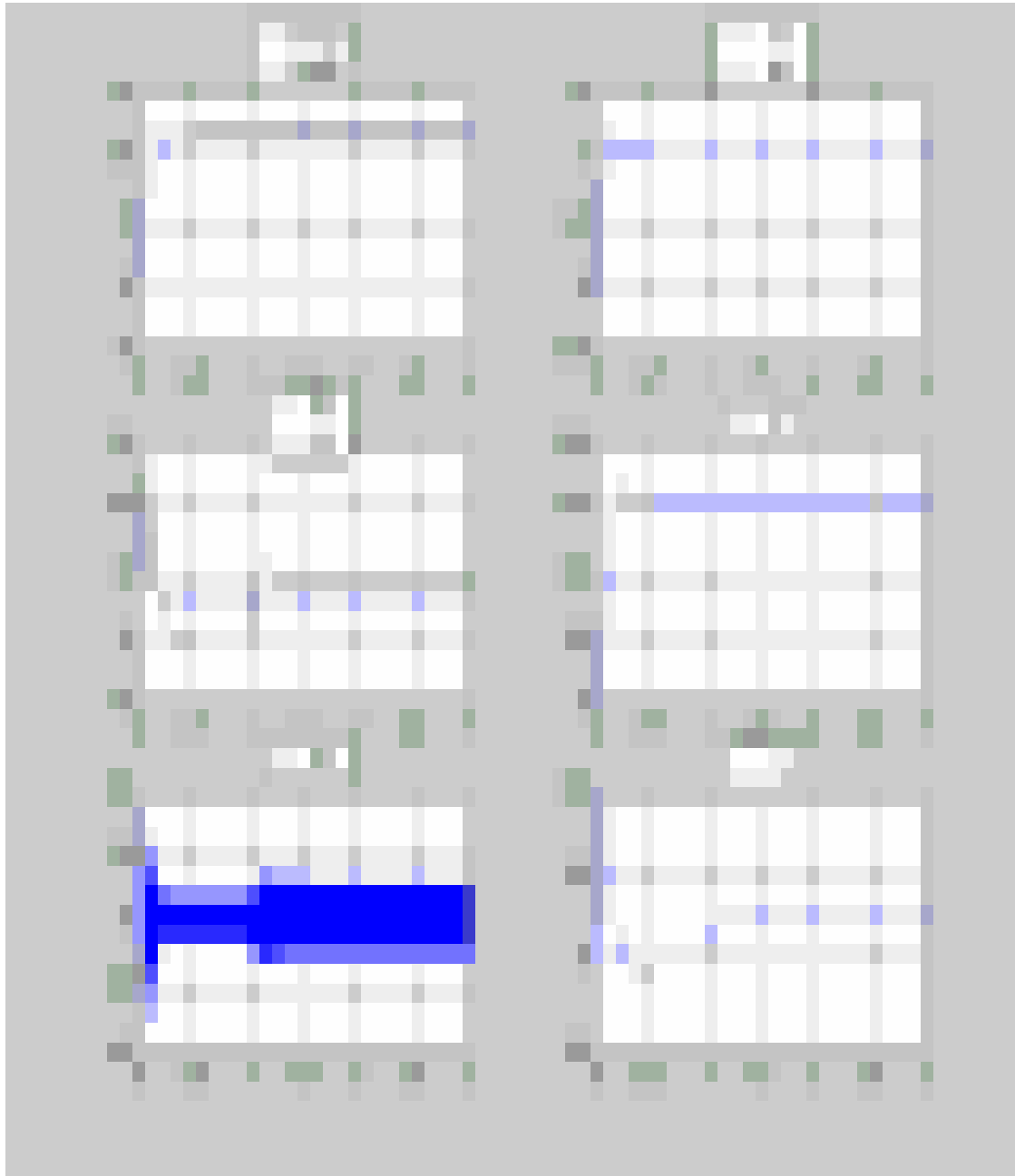
### III-7 INTERPRETAION DES RESULATS DES SIMULATION:

Le schéma de commande décrit par la *fig (III-7)* a été estimé par simulation numérique afin de démontrer l'efficacité de l'estimateur MRAS. La *fig (III-8)* montre bien l'évolution de la valeur de référence de l'inverse de la constante de temps rotorique et sa valeur estimée. Il est clair que la valeur estimée de l'inverse de la constante de temps rotorique converge vers sa référence.

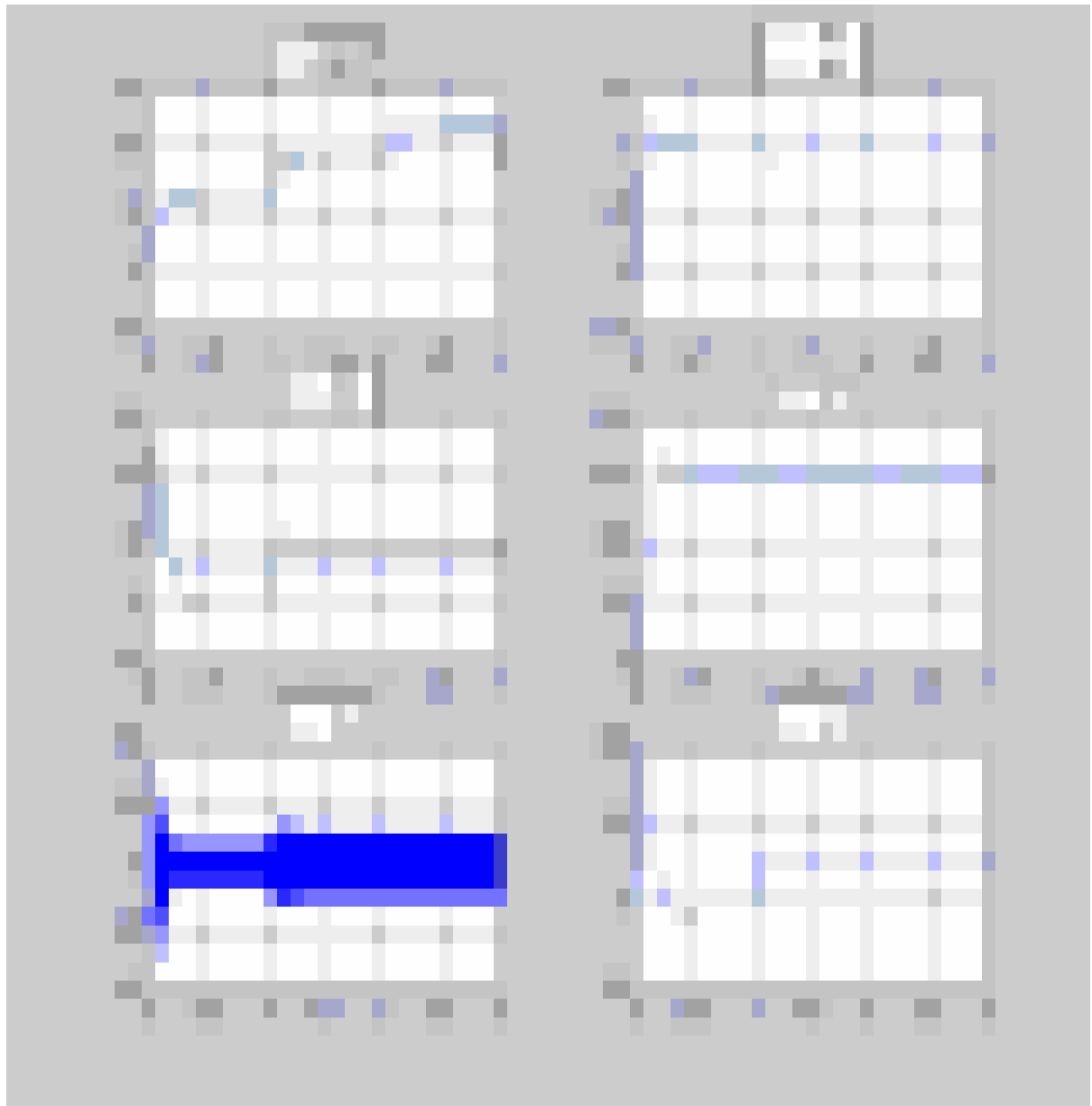
Les tests pour une charge nominale avec une estimation de  $T_r^{-1}$  sont représentés par la *fig (III-8)* montrent évidemment la bonne poursuite des réponses et un découplage parfait entre le flux et le couple..

Les *fig (III. 9 à 13)* montrent le comportement du moteur vis à vis d'une variation de  $T_r^{-1}$  où sont représentés la vitesse, le flux, le couple et le courant statorique avec variation de la charge. Les résultats obtenus montrent qu'avec l'estimation proposée le découplage est maintenu et que le flux rotorique suit exactement sa référence avec une bonne orientation sur l'axe d, on peut dire que les résultats sont robustes.

On a effectué des variations de vitesse afin de tester cet estimateur à basse vitesse, les réponses de la vitesse, du flux, de couple et de courants obtenues sont satisfaisantes.

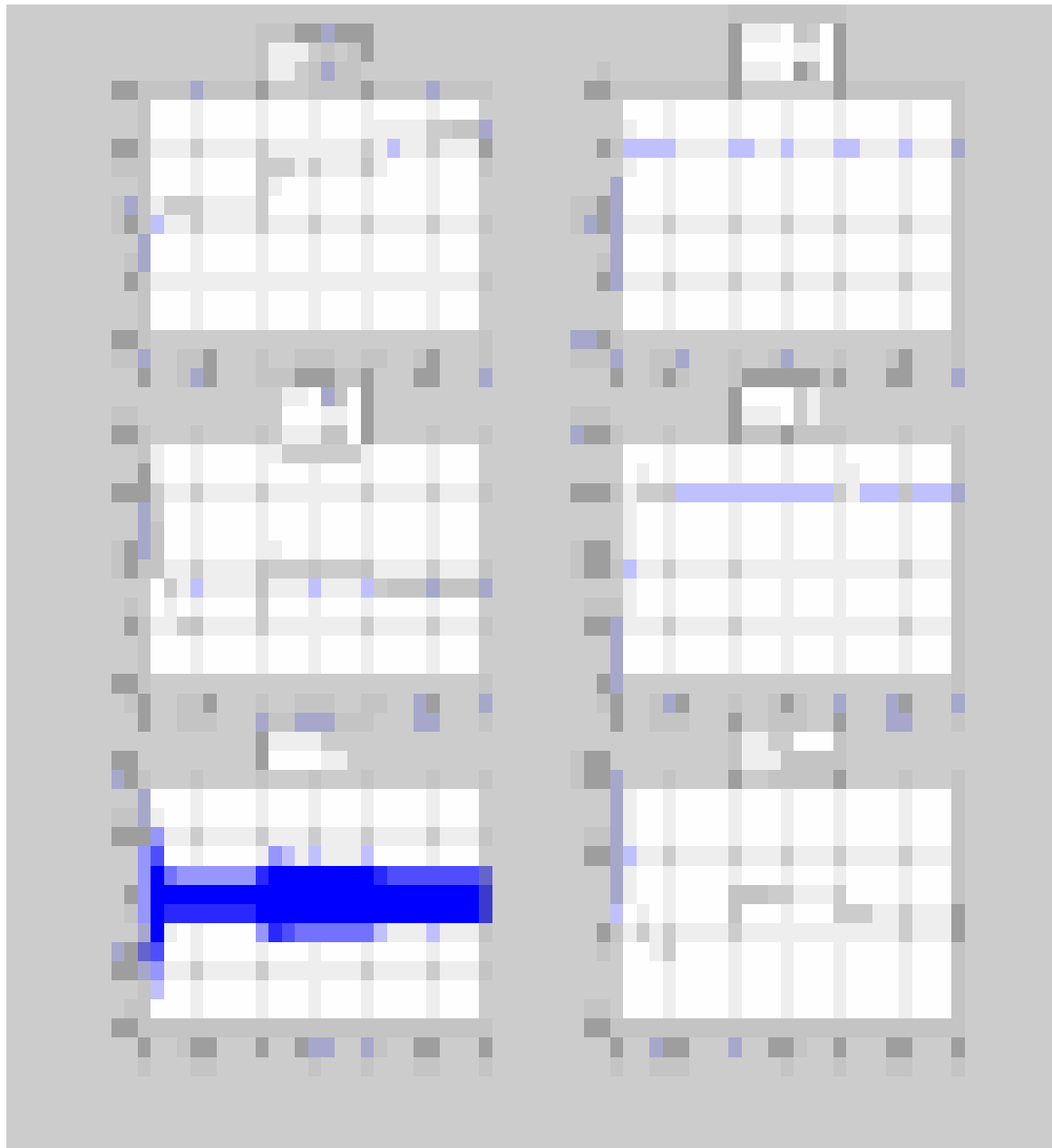


*fig (III-8) Simulation Avec Appliquée La Charge Dans L'instant  $t=1s$ ;  $Cr=25 \text{ N.m}$*

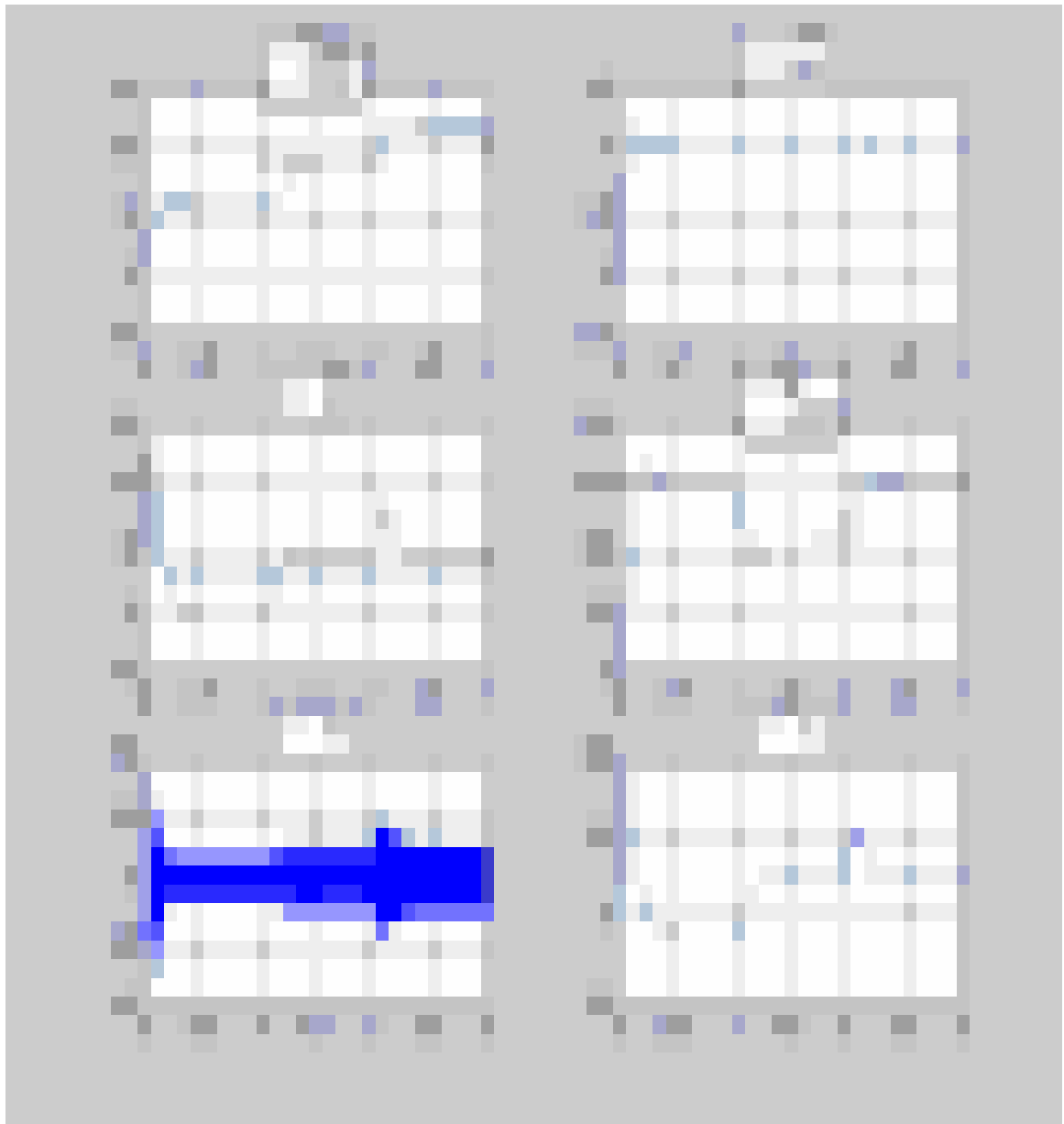


*fig (III-9) Simulation Avec Variation La Résistance Rotorique  $t=1s$ ;  $Cr=25 N.m$*

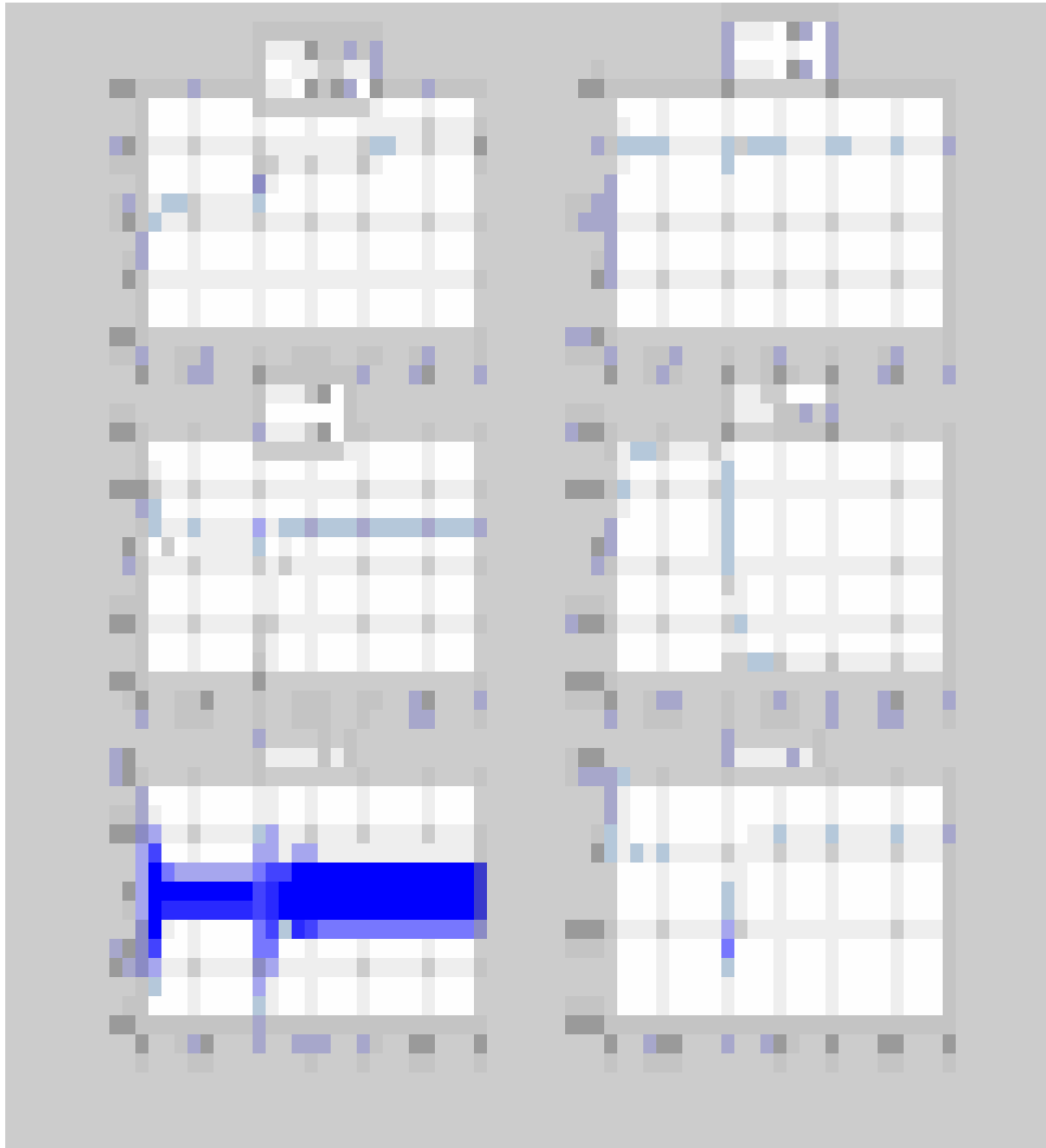




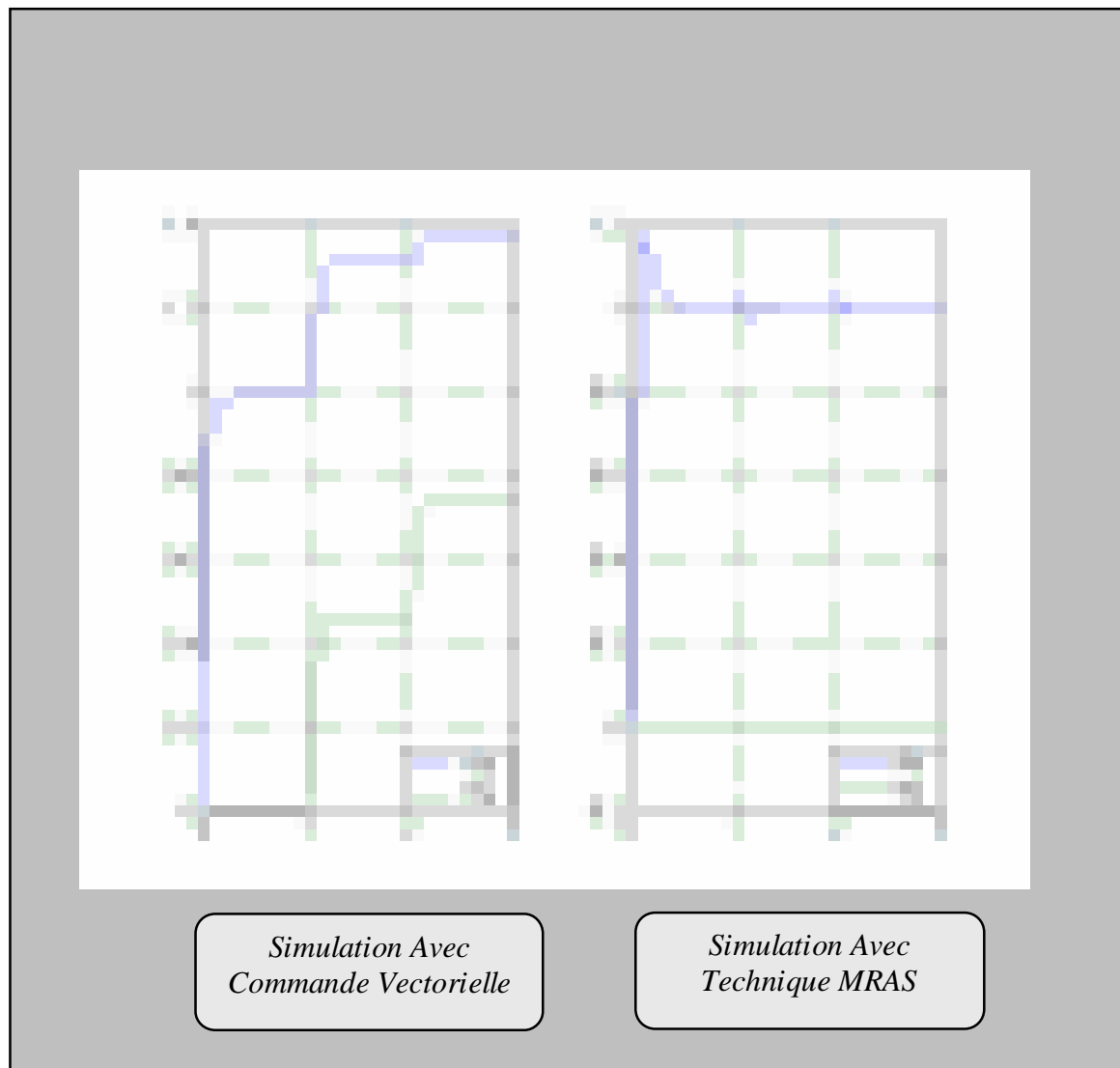
*fig (III-10) Simulation Avec Variation La Résistance Rotorique Et Avec Variation De La Charge;*



*fig (III-11) Simulation Avec Variation La Résistance Rotorique Et Avec Variation De La Vitesse Dans [ 1 2] s;*



*fig (III-12) Simulation Avec Variation La Résistance Rotorique Et Avec L'inversion De Vitesse;*



*fig (III-13) Simulation Avec Variation La Résistance Rotorique:*

**III-8 CONCLUSION:**

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier lieu une présentation sur l'estimateur d'états et nous avons présenté l'estimateur de constant de temps rotorique;

En effet les résultats avec l'association de technique de MRAS présentent de bonne performance et robustesses sont régime dynamique ou permanent, et les résultats des simulations montrent que l'utilisation de l'estimateur est important dans la commande vectorielle, et de la MAS;

Finalement on peut conclure que l'utilisation de l'estimateur apporte une amélioration à la structure bouclée. Mis d'un autre côté, il nécessite la connaissance de la vitesse de rotation du rotor d'une machine;