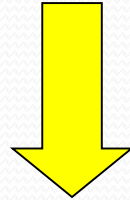


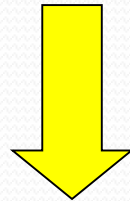
Entraînement à vitesse variable de la machine asynchrone

**CONTRÔLE
VÉCTORIEL**

L'intérêt de la commande vectorielle



assurer le découplage du flux et du couple



retrouver un comportement semblable à celui de la machine à courant continu

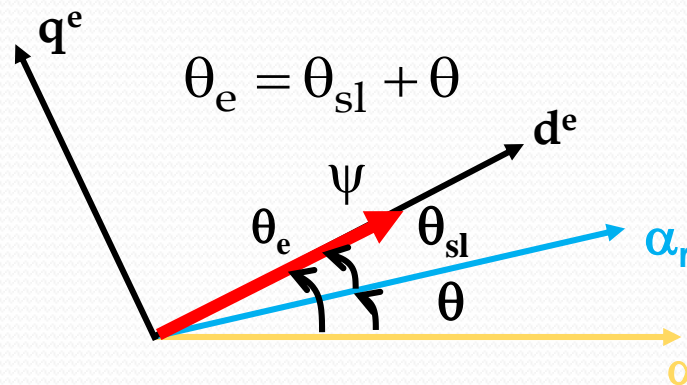
Principe de la commande vectorielle à flux orienté

Le but majeur de l'orientation du flux est d'assurer un **découplage** entre les grandeurs de contrôle de la machine soient **le flux** et **le couple**.

Orientation du flux d'entrefer : $\Psi_{dm} = \Psi_m$ et $\Psi_{qm} = 0$

Orientation du flux statorique : $\Psi_{ds} = \Psi_s$ et $\Psi_{qs} = 0$

Orientation du flux rotorique : $\Psi_{dr} = \Psi_r$ et $\Psi_{qr} = 0$



La commande vectorielle ou contrôle à flux orienté consiste à **orienter le flux** de la machine suivant **l'axe direct « d »** du repère tournant (d,q), **donc en quadrature** avec **le courant à l'origine du couple**.

Le but de la commande à flux orienté (FOC) est de **maintenir l'amplitude** du flux rotorique Ψ_r à **une valeur fixe** et modifier seulement **la composante du courant produisant le couple** afin de contrôler le couple de la machine à courant alternatif.

Principe de la commande vectorielle à flux orienté

Le problème essentiel de la commande vectorielle à flux orienté est de déterminer l'amplitude et la position du flux avec une certaine précision.

A cet effet, deux méthodes de contrôle vectoriel à flux orienté sont utilisées pour avoir la position du flux et on distingue :

1. La **commande vectorielle indirecte** qui **estime** uniquement **la position du flux rotorique**,
2. et la **commande vectorielle directe** qui utilise la **mesure directe** du flux ou plutôt le modèle de la machine pour **estimer la norme** et **la position du flux rotorique**.

Type de contrôle de flux :

Contrôle direct : Le flux est régulé par une contre réaction. Il peut être : Mesuré (rarement) ou Estimé.

Contrôle indirect : le flux est fixé en boucle ouverte, les tensions ou les courants assurent l'orientation du flux.

Contrôle vectoriel la machine asynchrone

Principe de la commande vectorielle à flux orienté

Les courants de référence dq dans le repère synchrone et la position du flux rotorique sont donnés par le bloc de la commande vectorielle. L'orientation du flux peut être indirecte ou directe suivant le concept utilisé.

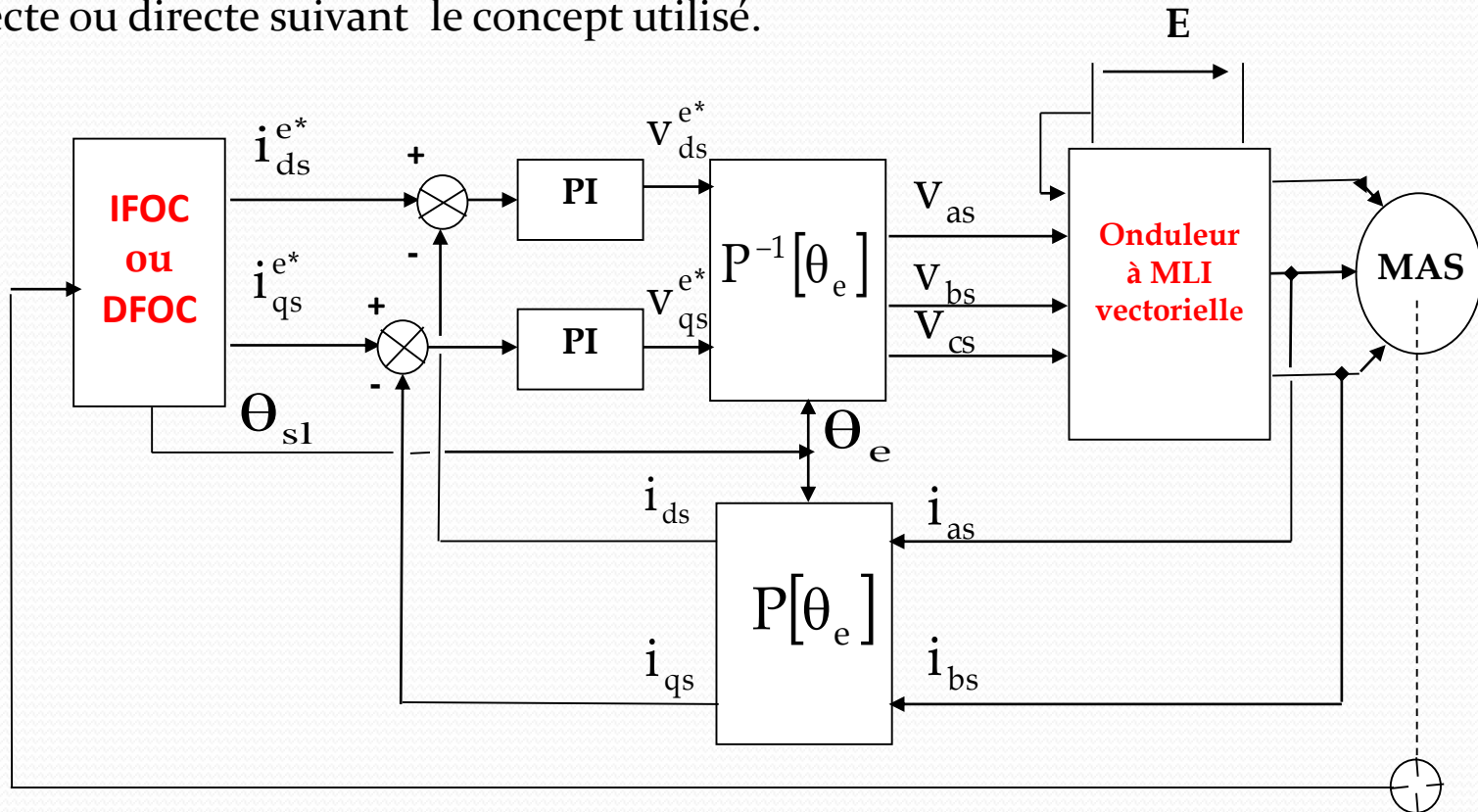


Schéma synoptique de la commande vectorielle d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à MLI vectorielle.

Commande vectorielle indirecte :

La technique de commande vectorielle à flux orienté indirecte (IFOC) est très utilisée dans les systèmes d'entraînement de haute performance d'une machine asynchrone.

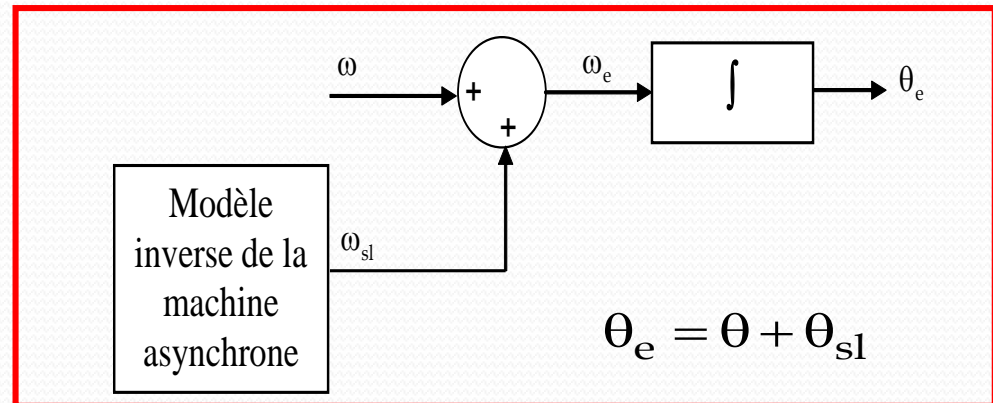
Pour ce type de contrôle, **le flux n'est ni mesuré ni reconstruit**. Le principe consiste tout simplement à **l'estimation de la position du flux à partir du modèle inverse de la machine en régime dynamique**.

En effet, la somme de la vitesse mécanique du rotor, habituellement mesurée, à la vitesse glissement, **calculée à partir du modèle inverse de la machine**, détermine la **fréquence angulaire du vecteur de flux rotorique**.

L'intégration de cette dernière donne la position du flux, c'est la condition d'autopilotage donnée par : $\theta_e = \theta_{sl} + \theta$.

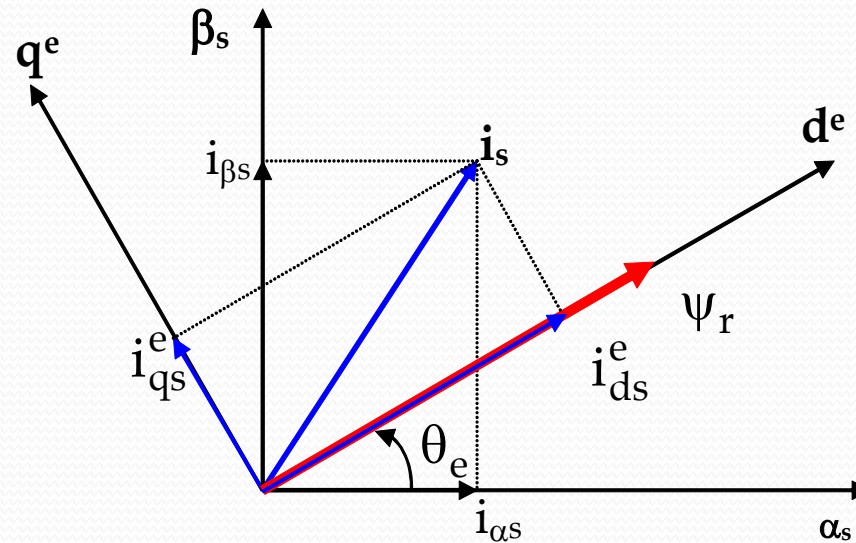
Elle consiste tout simplement à **l'estimation de la position du flux** à partir du modèle de la machine en régime dynamique.

Mesure indirecte de la position du flux.



Commande vectorielle indirecte : Orientation indirecte du flux rotorique

Pour effectuer le découplage par orientation du flux rotorique, nous nous plaçons dans le cas du **repère synchrone lié au champ tournant** avec orientation du repère (d^e, q^e) suivant le flux rotorique tel que le **module du flux rotorique coïncide avec l'axe direct « d »**.



L'expression du couple électromagnétique peut-être aussi décrit en termes du flux rotorique et des courants statoriques, soit :

$$\mathbf{T}_{em} = n_p \frac{M}{L_r} \tilde{\Psi}_r \times \vec{i}_s \quad \longrightarrow \quad \mathbf{T}_{em} = n_p \frac{M}{L_r} (\Psi_{dr}^e i_{qs}^e - \Psi_{qr}^e i_{ds}^e) \quad \begin{cases} \Psi_{dr}^e = \Psi_r \\ \Psi_{qr}^e = 0 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{T}_{em} = n_p \frac{M}{L_r} \Psi_r i_{qs}^e$$

Commande vectorielle indirecte : Orientation indirecte du flux rotorique

A partir du modèle d'état de la machine, donné par le système d'équation, ayant comme variables d'état les courants statoriques et les flux rotoriques :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) & \omega_e & \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} & \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{M} \omega_r \\ -\omega_e & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) & -\left(\frac{1-\sigma}{\sigma}\right) \frac{1}{M} \omega_r & \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{M T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

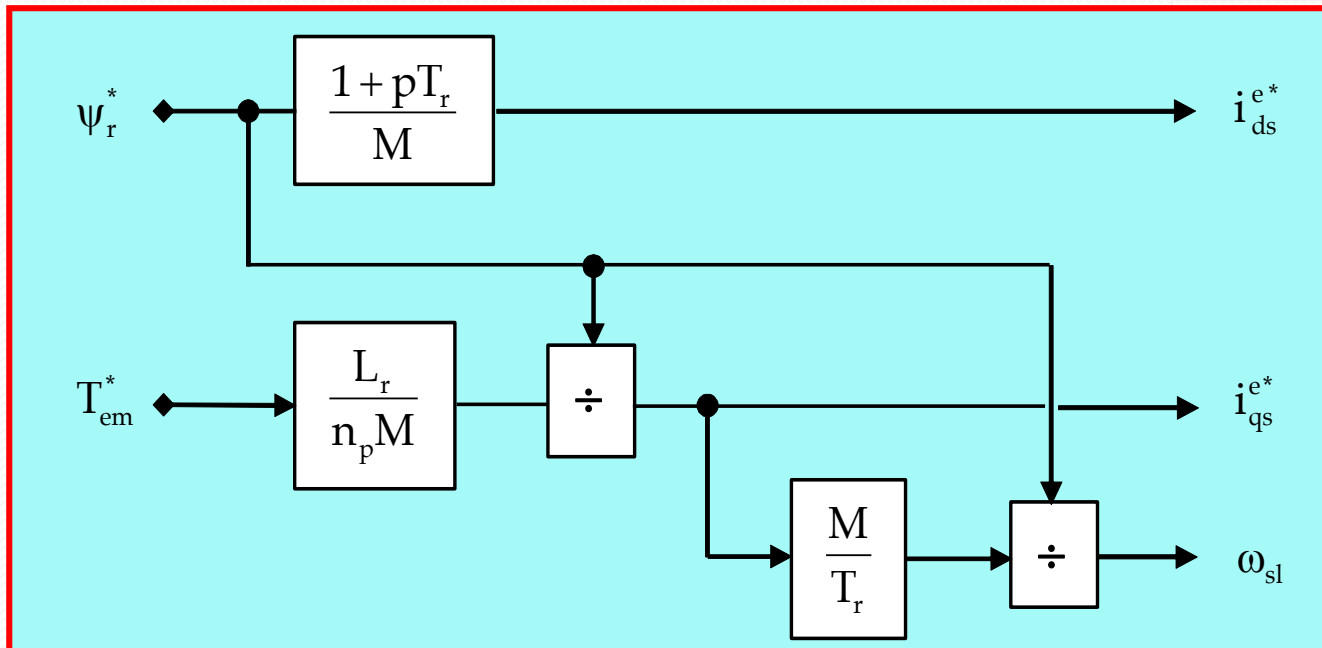
Nous avons :
$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds}^e - \frac{1}{T_r} \psi_r \quad \text{et} \quad 0 = \frac{M}{T_r} i_{qs}^e - \omega_{sl} \psi_r$$

La transformée de Laplace appliquée à l'équation (1) permet d'écrire :
$$\psi_r = \frac{M}{1 + T_r p} i_{ds}^e$$

En introduisant la vitesse angulaire de glissement, nous avons :
$$\omega_{sl} = \frac{M}{T_r \psi_r} i_{qs}^e$$

Commande vectorielle indirecte : Orientation indirecte du flux rotorique

La figure suivante illustre la structure d'une commande vectorielle indirecte du modèle découplé de la machine asynchrone dans le cas d'une orientation du flux rotorique.



Modèle découplé dans le cas d'une orientation du flux rotorique.

Commande vectorielle indirecte : Estimation du Ψ_r


Les grandeurs rotoriques ne sont pas accessibles, il faut les prévoir à partir des grandeurs statoriques.

$$\Psi_r = \frac{M}{1 + T_r p} i_{ds}^e$$

T_r : constante de temps rotorique

La pulsation de glissement est donnée par :

$$\omega_{sl} = \frac{M}{T_r \Psi_r} i_{qs}^e$$

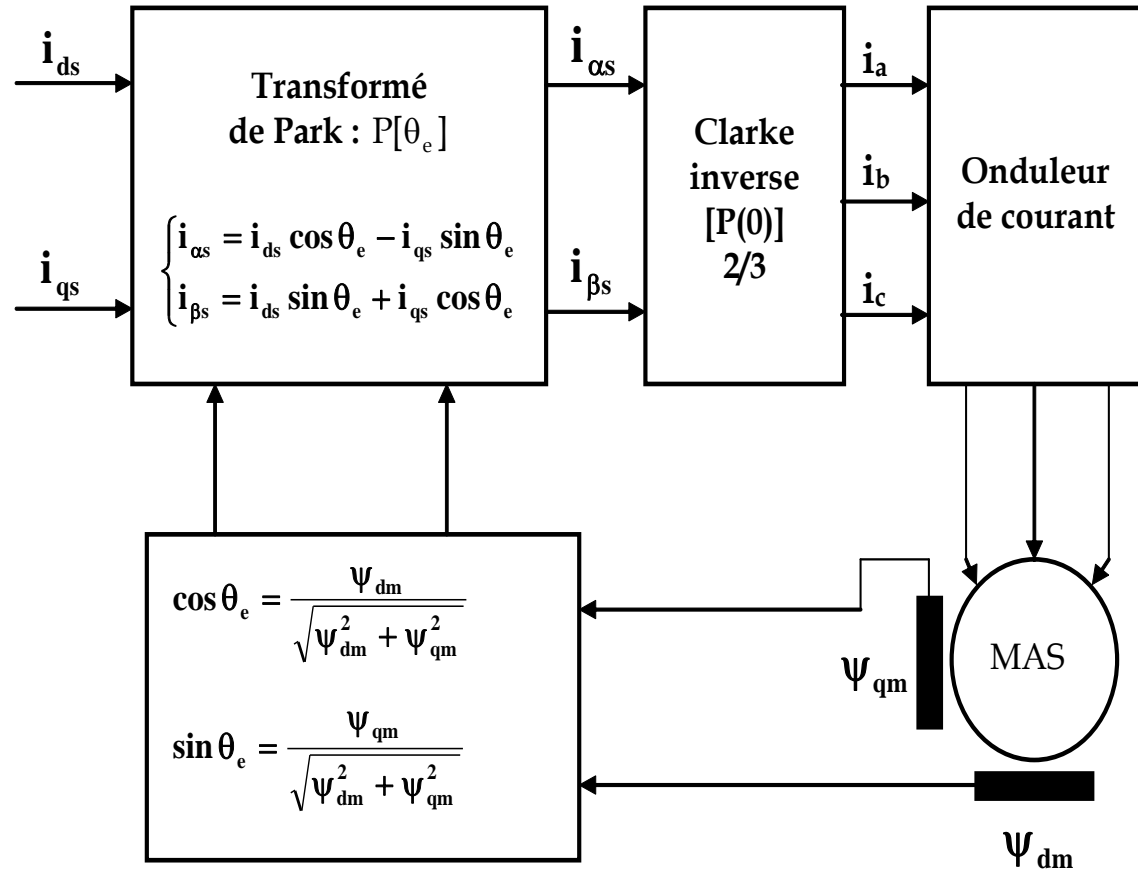
La loi de autopilotage  $\omega_e = \omega_{sl} + n_p * \Omega$
position du champ tournant

Commande vectorielle directe :

1 : flux mesuré :

La technique de commande vectorielle à flux orienté directe est basée sur la détermination instantanée de l'amplitude et de la position du flux. L'idée naturelle est de mesurer la densité du flux d'entrefer à l'aide de capteurs à effet Hall ou magnétiques placés dans l'entrefer.

Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que ces capteurs de flux sont coûteux, nécessitent une installation spéciale et ont besoin d'entretien.



Commande vectorielle directe :

2: flux estimé

Dans le cas général, le flux est plutôt reconstitué à partir de l'état de la machine par des estimateurs utilisés en boucle ouverte. Ainsi, les équations :

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds}^e - \frac{1}{T_r} \psi_r$$

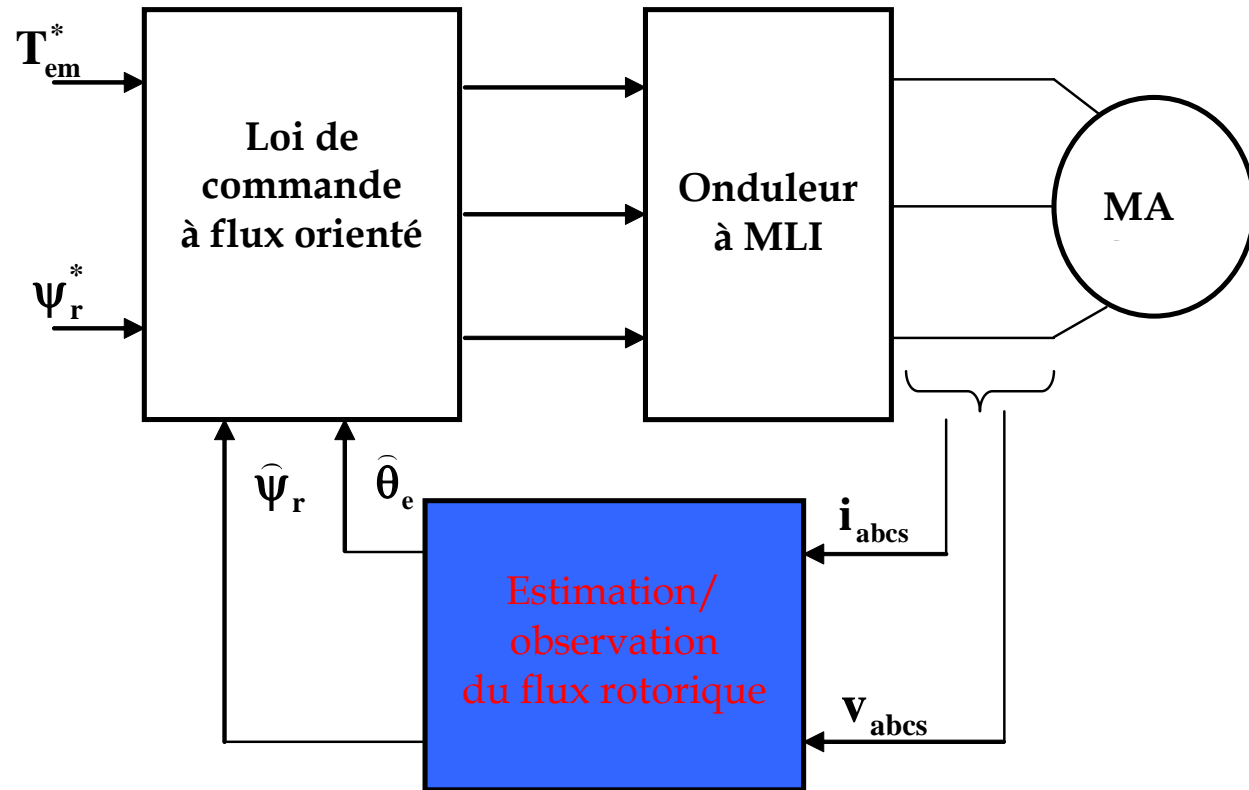
$$\omega_{sl} = \frac{M}{T_r \psi_r} i_{qs}^e$$

permettent d'estimer la valeur du flux , tel que :

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds}^e - \frac{1}{T_r} \hat{\psi}_r$$

alors que sa position est donnée par :

$$\frac{d\hat{\theta}_e}{dt} = \frac{M}{T_r \hat{\psi}_r} i_{qs}^e + n_p \Omega$$



Commande à flux orienté directe avec estimation du flux

Commande vectorielle indirecte :

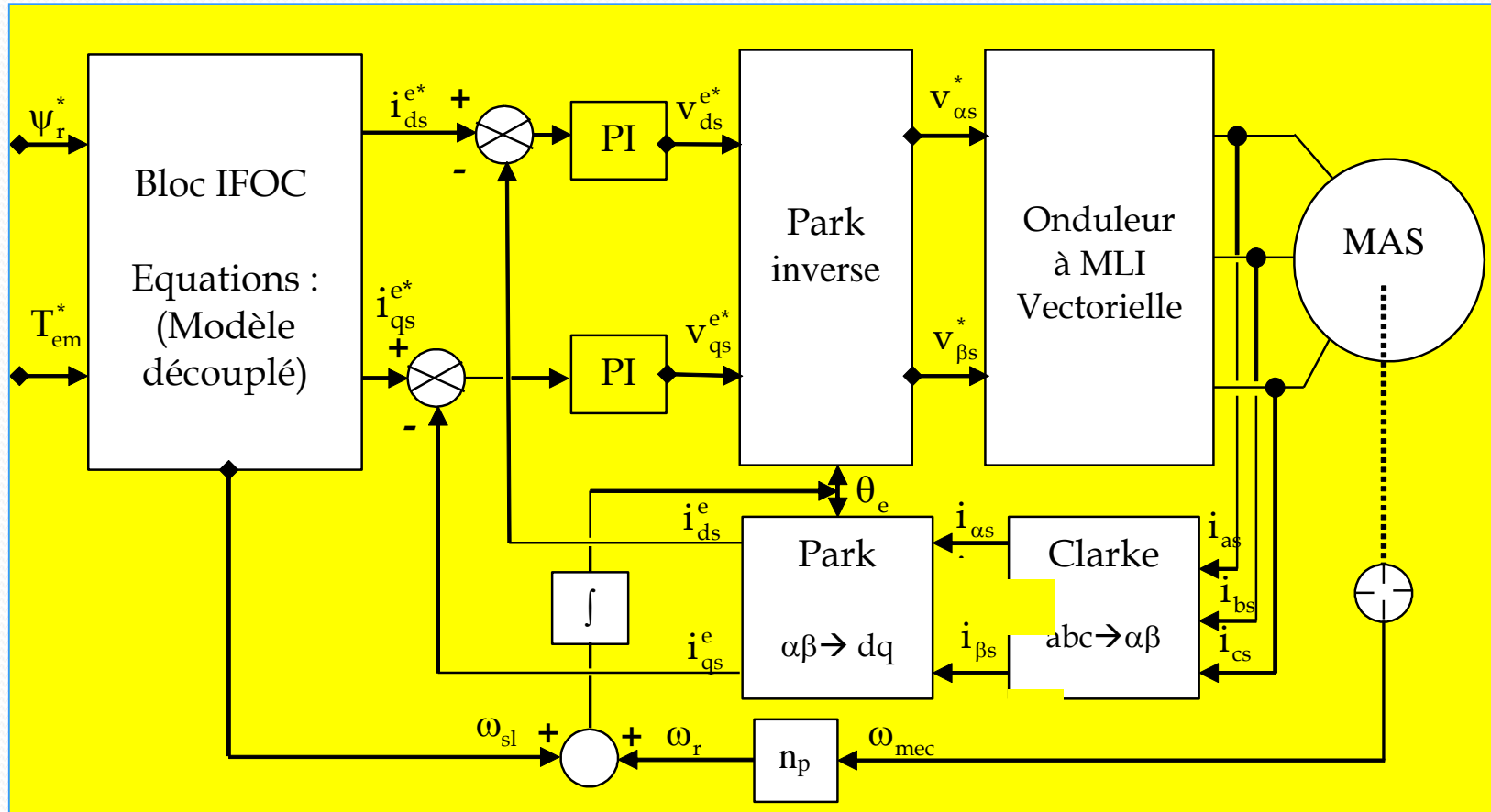
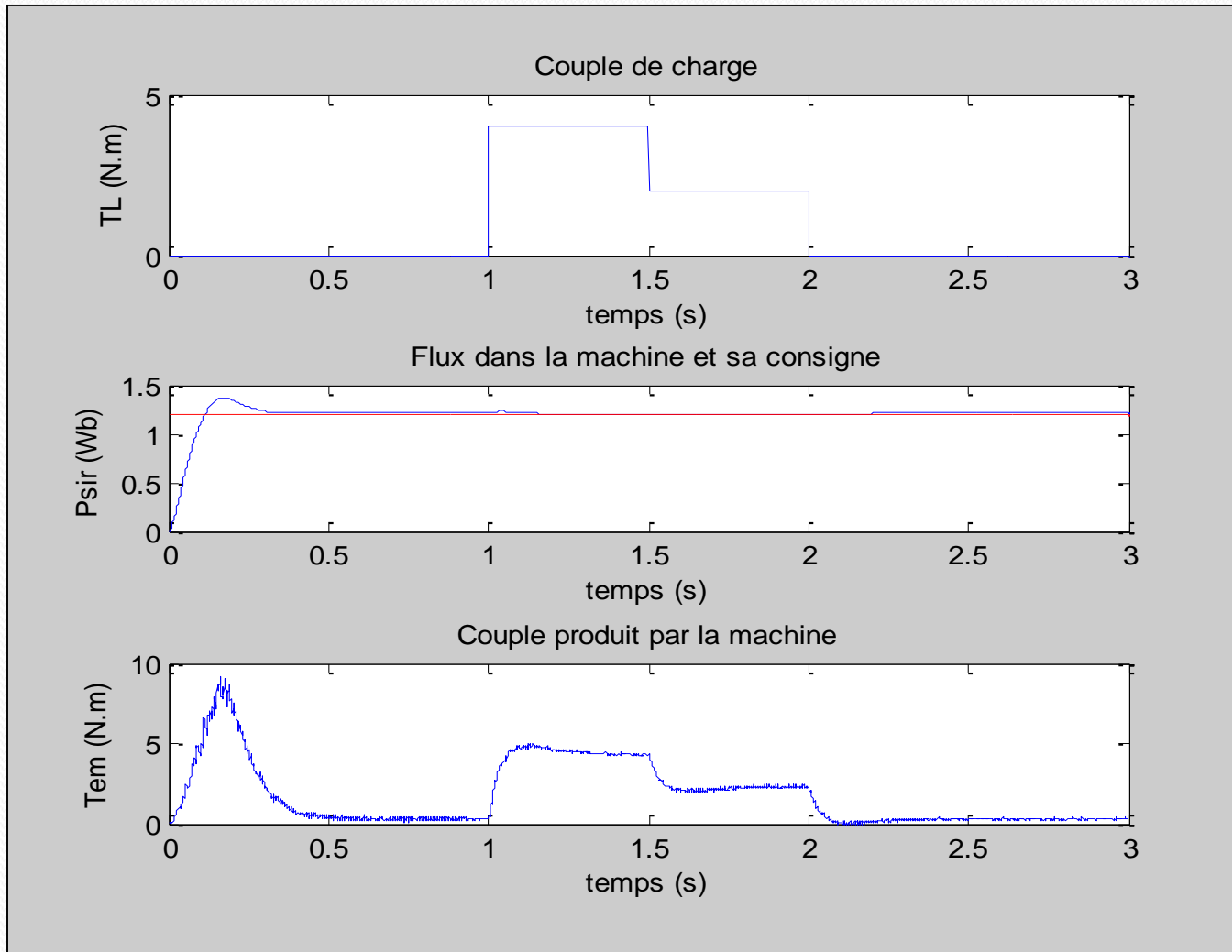


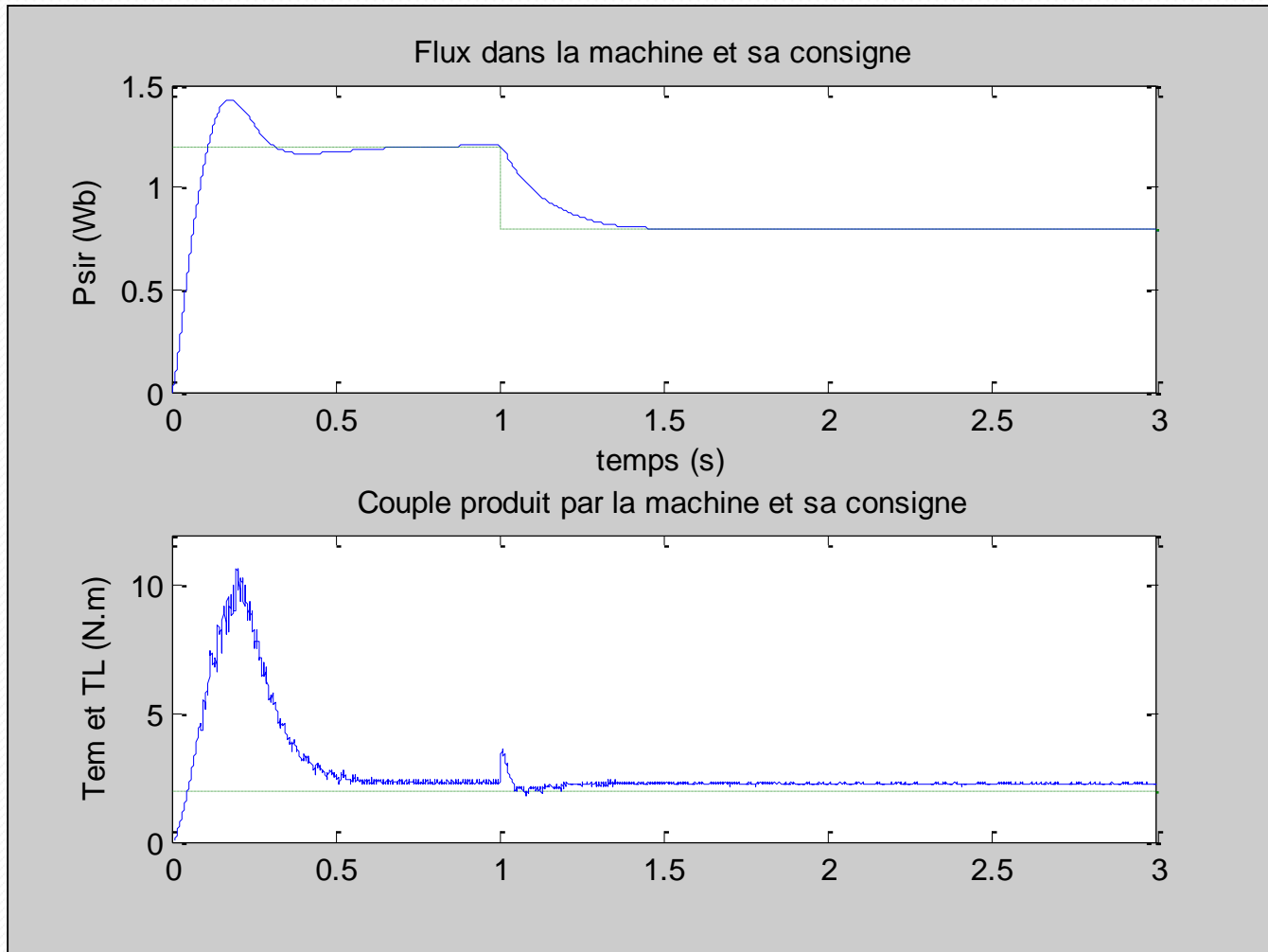
Schéma bloc de la commande vectorielle flux rotorique orienté indirecte

Contrôle vectoriel la machine asynchrone



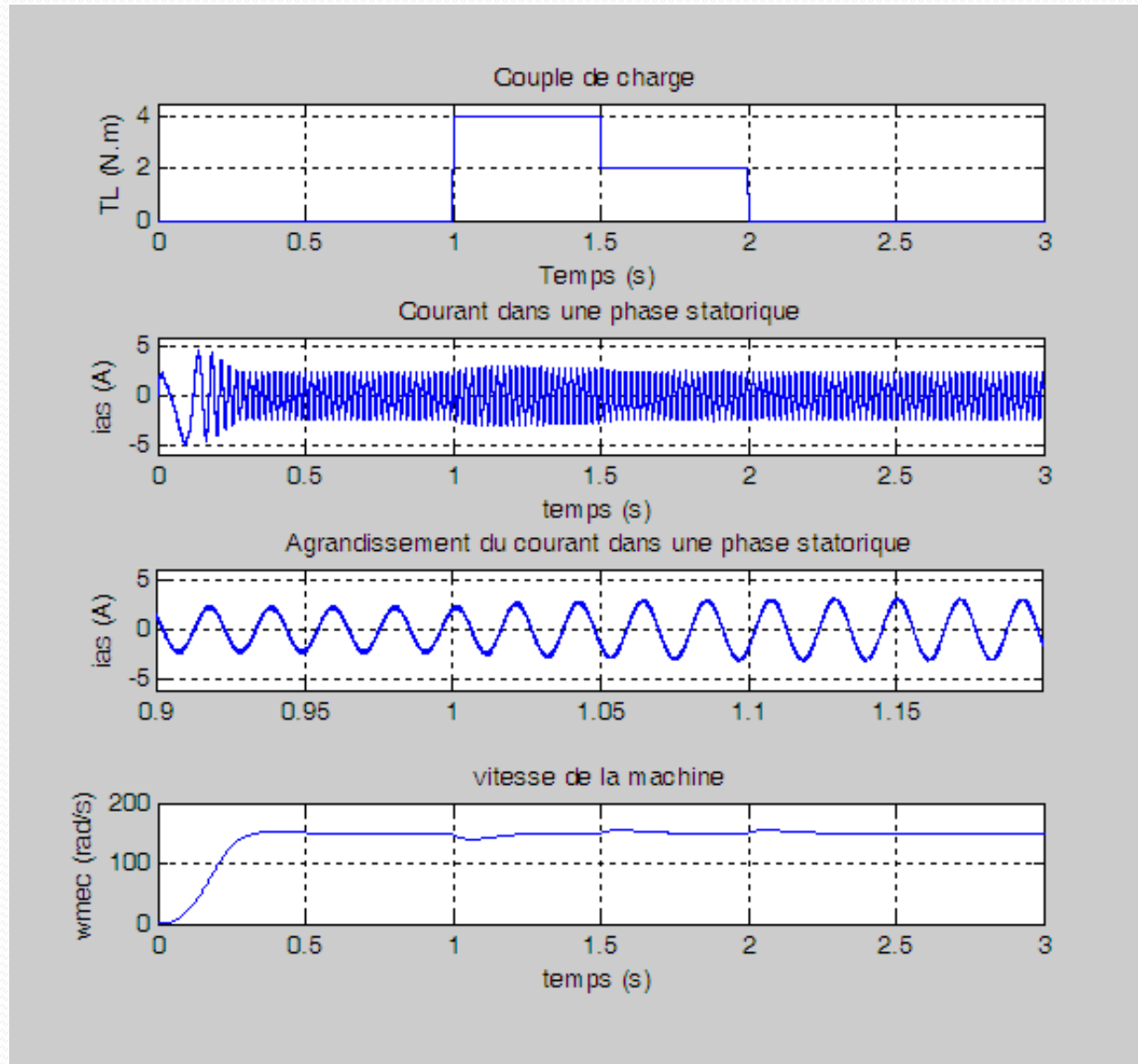
Performances de la commande vectorielle indirecte. Allures du flux, du couple de charge appliqué et du couple moteur.

Contrôle vectoriel la machine asynchrone



***Performances de la commande vectorielle indirecte.
Couple constant et flux variable.***

Contrôle vectoriel la machine asynchrone



Contrôle vectoriel la machine asynchrone

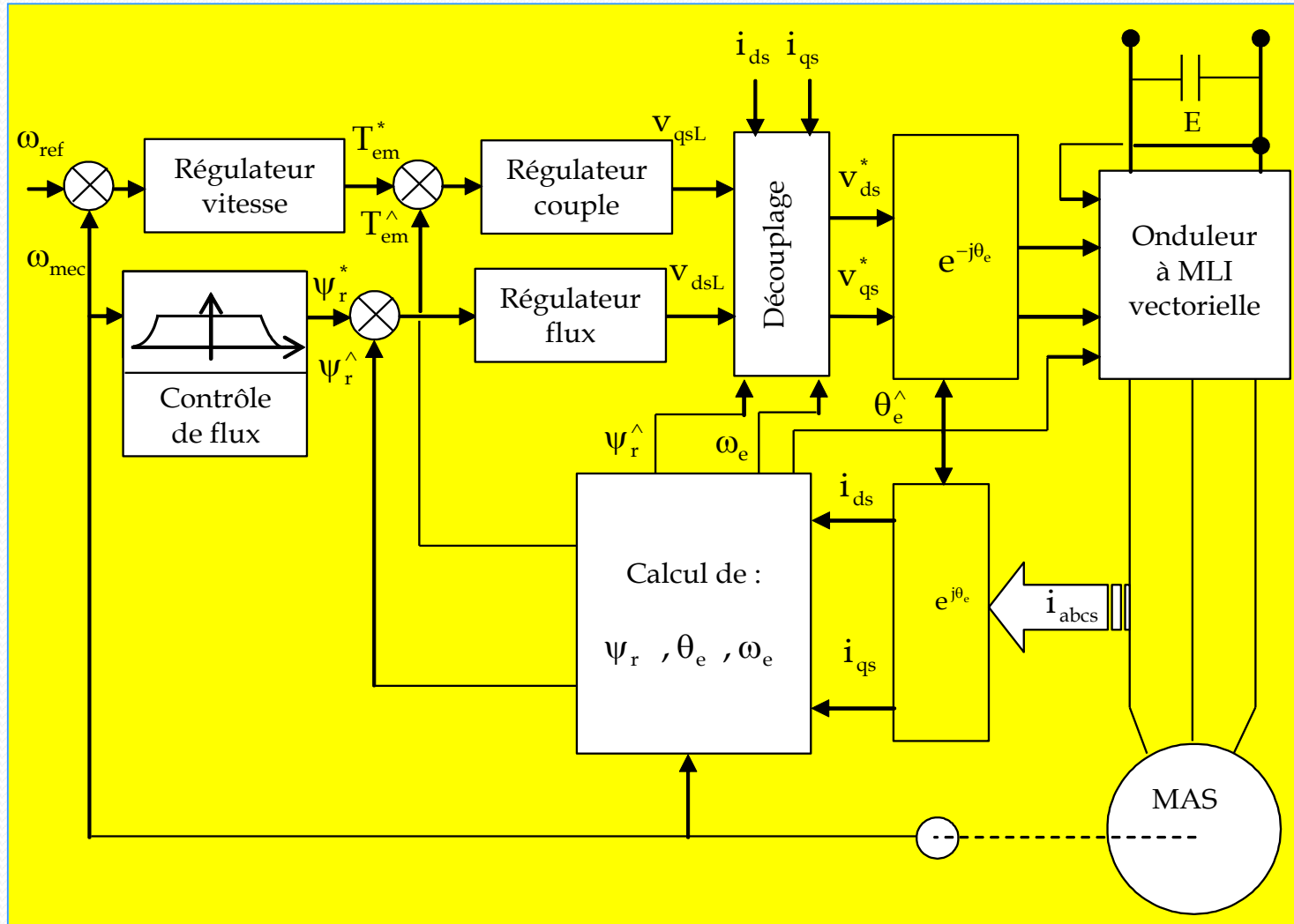
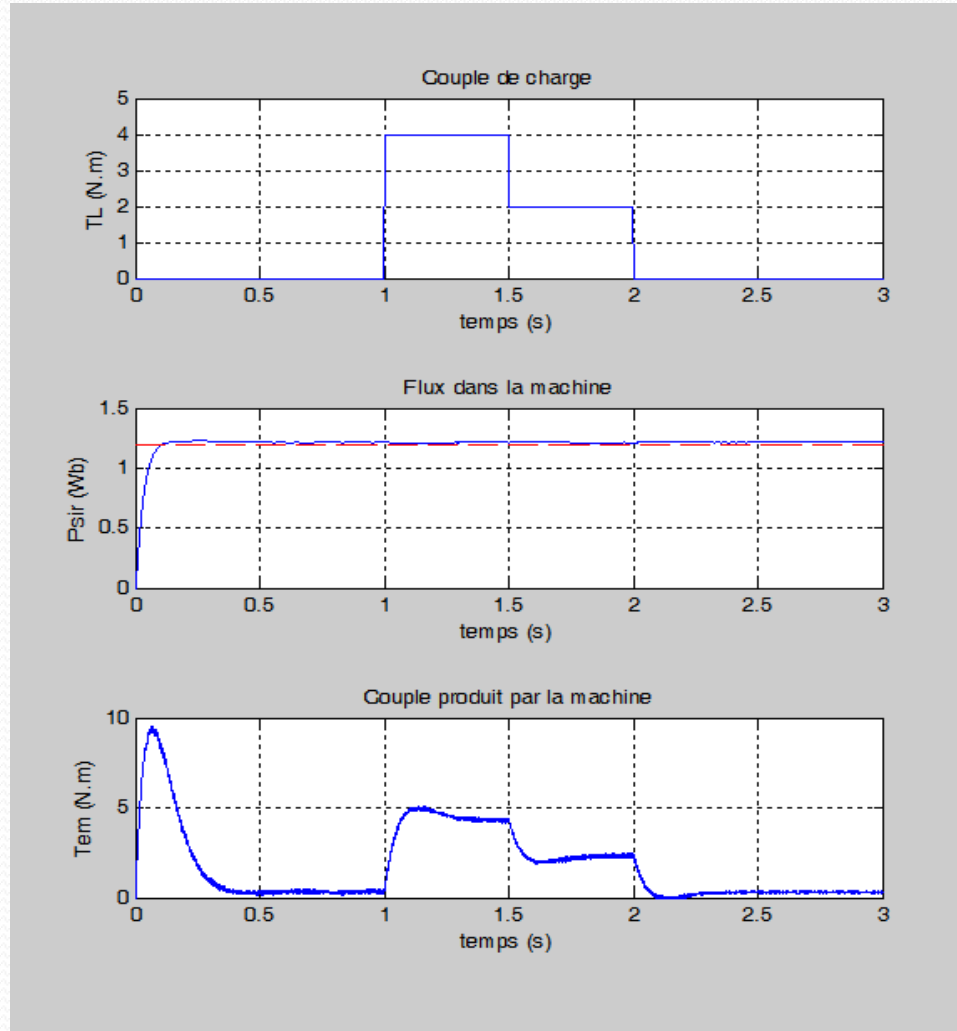


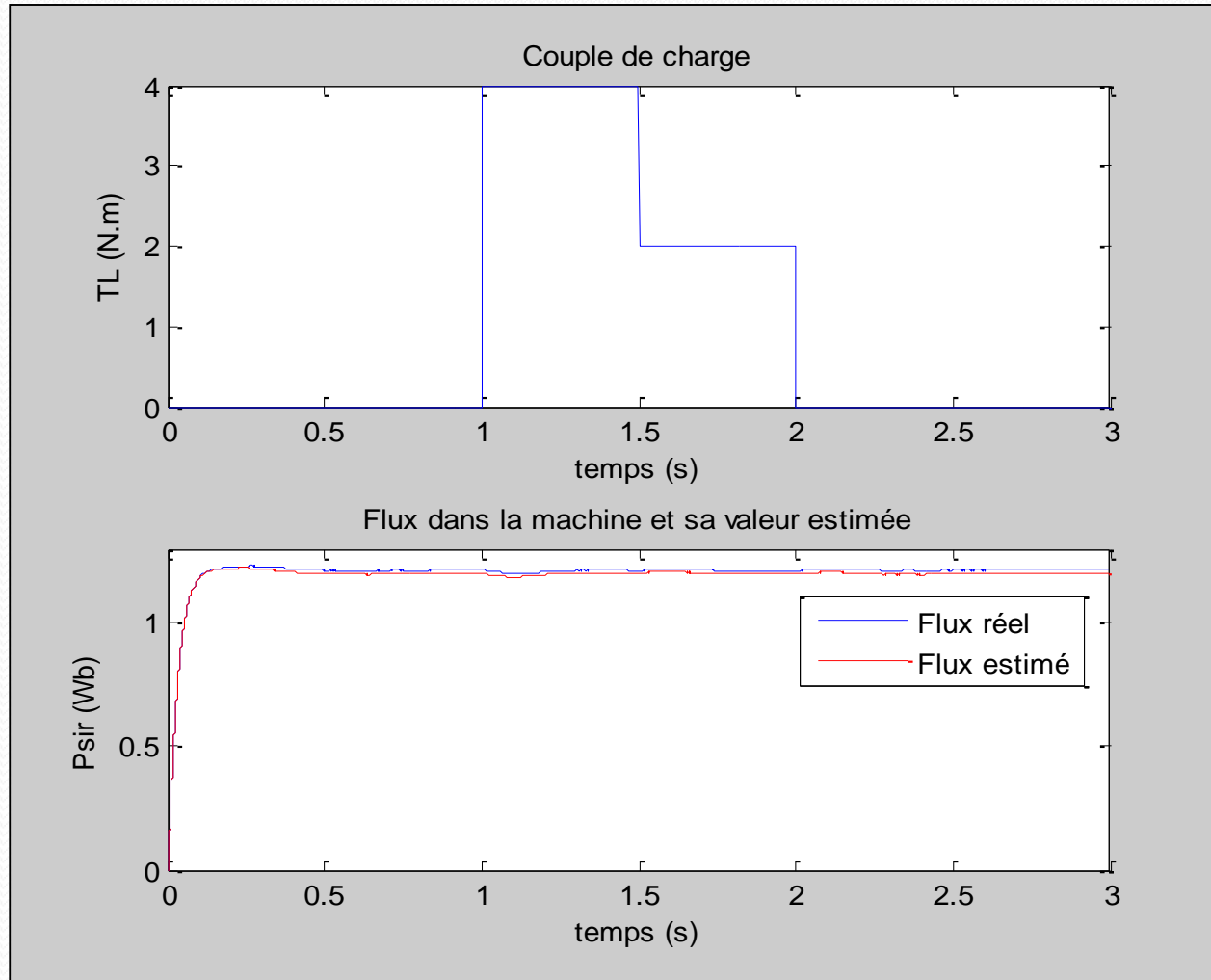
Schéma bloc de la commande vectorielle directe à flux orienté (DFOC).

Contrôle vectoriel la machine asynchrone



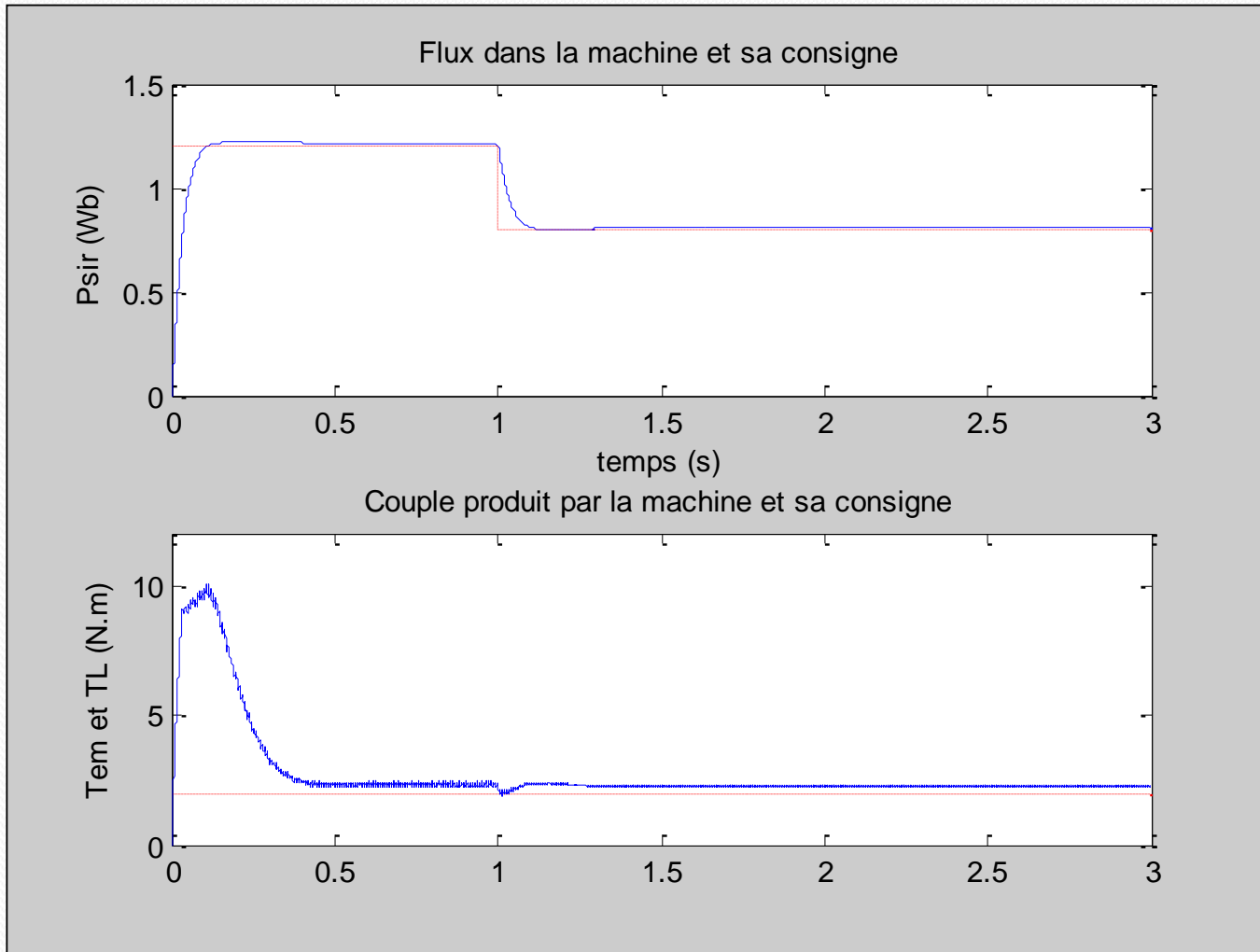
Performances de la commande vectorielle directe. Allures du couple de charge appliqué, flux dans la machine et couple électromagnétique.

Contrôle vectoriel la machine asynchrone



Performances de la commande vectorielle directe. Allures du couple de charge appliqué, du flux dans la machine et sa valeur estimée.

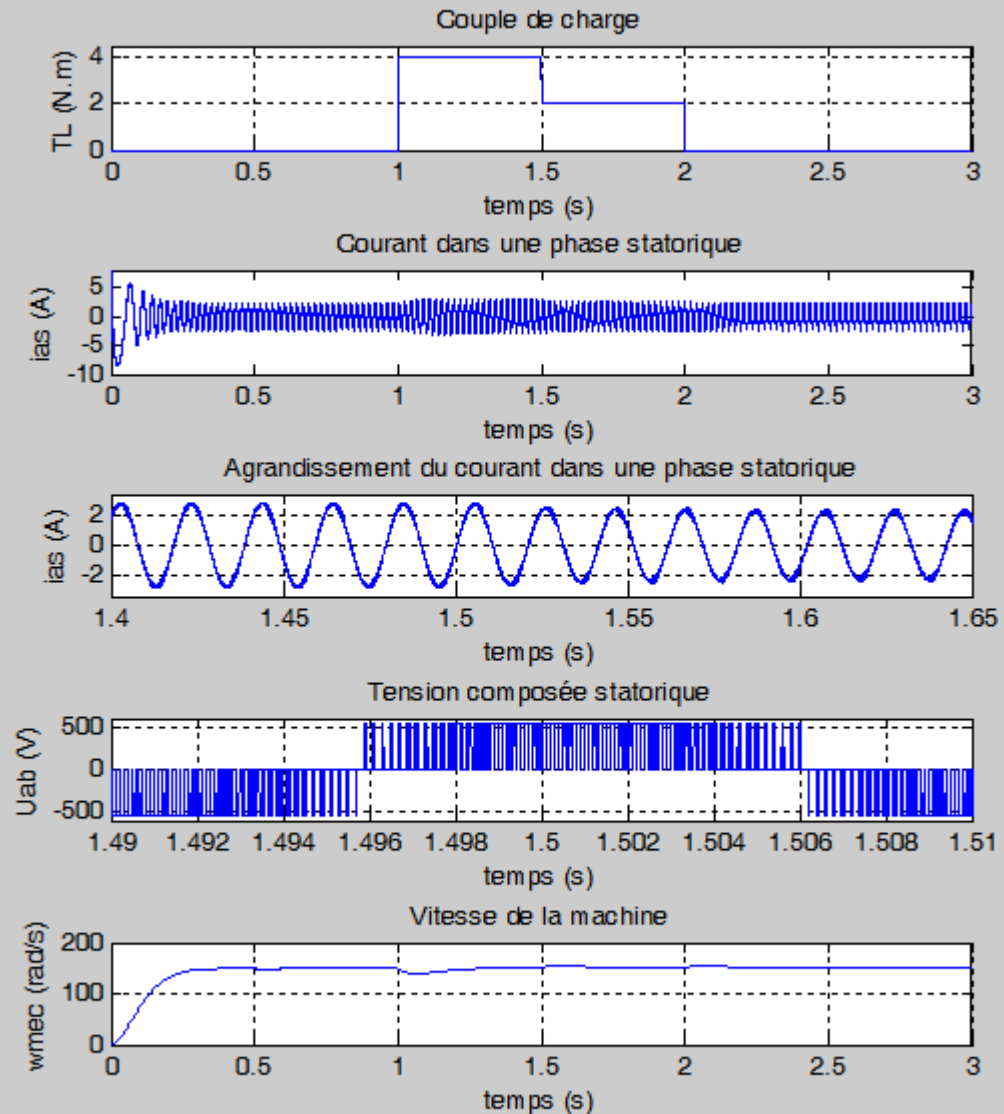
Contrôle vectoriel la machine asynchrone



***Performances de la commande vectorielle directe.
Couple constant et flux variable.***

Contrôle vectoriel la machine asynchrone

*Performances de la commande vectorielle directe :
Allures du couple de charge appliqué, courant de phase tension entre phases et la vitesse.*





FIN