

# Compte rendu de PFE

---

*Commande d'une machine à reluctance variable sans capteur mécanique pour une application aéronautique*

**ANTOINE HAMY – CINDY MARLARD**

**PAUL MUGNIER – NICOLAS RECHATIN**

Spécialité : Avionique & Commande de Vol

*5 Février 2017*



# Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>LA MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE .....</b>	<b>4</b>
2.1	CONTEXTE.....	4
2.2	FONCTIONNEMENT DE LA MRV .....	5
2.3	FONCTIONNEMENT DE LA MRV SANS CAPTEUR : PRINCIPE D'AJOUT D'UN OBSERVATEUR .....	6
<b>3</b>	<b>REPLACEMENT DU CAPTEUR MANQUANT PAR UN OBSERVATEUR.....</b>	<b>7</b>
3.1	OBSERVATEUR PAR MODE GLISSANT .....	7
3.1.1	<i>Théorie.....</i>	7
3.1.2	<i>Mise en équation du capteur de position par mode glissant .....</i>	8
3.1.3	<i>Implémentation sous Simulink du capteur dans une MRV PI/MG .....</i>	10
3.1.4	<i>Test de la robustesse dans le cas d'une MRV PI/MG .....</i>	12
3.1.5	<i>Implémentation sous Simulink du capteur dans une MRV MG/MG .....</i>	14
3.1.6	<i>Test de la robustesse.....</i>	16
3.2	FILTRE DE KALMAN .....	18
3.2.1	<i>Théorie.....</i>	18
3.2.2	<i>Mise en équation du capteur de position par la méthode de Kalman ...</i>	21
3.2.3	<i>Implémentation .....</i>	22
3.2.4	<i>Test de robustesse.....</i>	24
3.3	COMPARAISON DES OBSERVATEURS .....	25
<b>4</b>	<b>COMMANDE FTC (FAULT TOLERANT CONTROL) .....</b>	<b>25</b>
4.1	OBJECTIF DE LA COMMANDE FTC .....	26
4.2	SYNTHESE D'UNE COMMANDE FTC POUR LA MRV AVEC OBSERVATEUR .....	26
4.2.1	<i>Vérifier le rafraîchissement des données en sortie des blocs observateurs</i> <i>28</i>	28
4.2.2	<i>Vérifier que l'observateur ne donne pas de données « Hors Range ».....</i>	28
4.2.3	<i>Surveiller les fortes oscillations des signaux en sortie des observateurs. ....</i>	28
4.2.4	<i>Utiliser un algorithme de vote pour détecter les dégradations des</i> <i>observateurs.....</i>	28
4.2.5	<i>Remonter les pannes à « l'utilisateur » .....</i>	28
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>RETOUR D'EXPERIENCE ET GESTION DE PROJET.....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>INDEX DES FIGURES.....</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>INDEX DES TABLEAUX .....</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCES.....</b>	<b>37</b>

# 1 Introduction

Depuis les premiers vols au début du 20<sup>ème</sup> siècle, l'aéronautique n'a cessé d'évoluer. Plusieurs avancées technologiques ont pu voir le jour dans le domaine de la propulsion, avec le passage des moteurs à hélice vers les turboréacteurs, mais aussi dans le domaine de l'architecture qui ont permis d'avoir des avions très aérodynamiques et légers. Les dernières avancées concernent l'arrivée de l'électricité à bord des avions. A partir des années 1960, avec l'arrivée du Concorde, les commandes de vol électriques se sont développées pour permettre aux avions d'avoir une navigation plus précise et plus performante. Toute cette évolution s'est accompagnée d'intégration d'interfaces homme-machine, constituées d'ordinateurs de bord et d'électroniques embarqués permettant plus de sécurité et de confort. Aujourd'hui, de véritables challenges écologiques ont vu le jour tel que comment concevoir un avion 100% électrique. Deux projets ont déjà effectué leur premier vol : le Solar Impulse ou encore l'E-fan d'Airbus. Ces projets d'avion disposent de moteurs électriques qu'il est possible de rendre plus performant et plus robuste. C'est pourquoi le monde industriel s'intéresse aujourd'hui à d'autres technologies telle que la machine à reluctance variable.

L'objet de ce projet de fin d'étude est de comprendre comment fonctionne un moteur à reluctance variable utilisé comme moyen de propulsion. Ce genre de machine électrique dispose de capteurs mécaniques permettant de connaître à tout moment la position du rotor et donc sa vitesse. La connaissance de ce paramètre permet ensuite de réguler le courant passant dans chaque phase du système et ainsi contrôler le moteur. L'étude effectuée dans ce rapport, consiste à proposer une alternative de ce capteur mécanique lourd et encombrant, par un contrôle logiciel de la position et de la vitesse. L'une des difficultés est de concevoir un modèle suffisamment robuste pour ne pas engendrer l'arrêt du moteur, ce qui pourrait, dans le cadre d'une application aéronautique, engendrer des conséquences catastrophiques. Le contrôle des paramètres de position et de vitesse du rotor, étudié dans ce rapport, sont du type mode glissant d'ordre 2 et filtre de Kalman.

Comme tout projet, cette étude a été structurée par un cycle en V pendant 17 semaines. En effet, le projet a débuté par l'élection d'un chef de projet : Cindy Marlard. Cette personne est le lien direct entre le groupe et les tuteurs de projet Ahmed Chaibet et Moussa Boukhniher fournissant le Cahier des Charges. A la suite de ce choix, l'état de l'art a pu être réalisé. L'étape suivante consistait à faire le choix des observateurs puis de les implémenter. Enfin, une vérification de ces observateurs a été concrétisée afin de contrôler la robustesse de ces derniers.

C'est ainsi que le compte rendu de ce projet a également été réalisé : il sera tout d'abord présenté l'état de l'art sur la machine à reluctance variable, puis l'implémentation des observateurs ainsi qu'une synthèse sur la commande FTC (afin de gérer les cas de pannes dus à l'absence de capteur) et enfin la conclusion qui permettra de valider le projet ainsi que de faire un retour plus personnel sur celui-ci.

## 2 La machine à réluctance variable

### 2.1 Contexte

Le moteur à reluctance variable est une technologie en plein essor. Conçue il y a plus d'un siècle, ce moteur est entré il y a peu dans le monde de l'automobile pour une application de traction électrique. En effet, les moteurs électriques peuvent délivrer un fort couple à basse vitesse, avec un rendement 3 fois plus grand qu'un moteur conventionnel. Cette machine innovante, à coût plus faible, pourrait également faire son entrée dans le monde aéronautique afin d'améliorer les performances de propulsion dans un esprit plus écologique. Cependant la machine à reluctance variable (MRV) est complexe d'utilisation. En effet, des commandes classiques ne peuvent pas être implémentées dû aux caractères non linéaires des grandeurs électromagnétiques de ce moteur. De plus, le développement des batteries de stockage d'énergie est limité. C'est pourquoi, d'autres moteurs étaient préférés par les constructeurs : la machine à courant continu (MCC), le moteur asynchrone (MAS) ou encore le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP). Ces moteurs étaient favorisés par leur maitrises de fonctionnement, leur rendement, leur robustesse cependant ils peuvent être trop encombrant, peu fiable, trop couteux ou comporter une limite de fonctionnement. Voici ci-joint, un tableau récapitulatif se trouvant dans la thèse [2].

**Tableau 1 – Comparatif des moteurs électriques**

	MCC	MAS	MSAP	MRV
<i>Plage de vitesse</i>	2,5	4,5	4,5	<b>5</b>
<i>Rendement</i>	2	4	<b>5</b>	4,5
<i>Poids</i>	2	4	4,5	<b>5</b>
<i>Prix</i>	<b>5</b>	4	3	4
<i>Total</i>	11,5	16,5	17	18,5

Hormis le caractère non linéaire de la MRV, cette machine est donc considérée favorable par rapport aux moteurs existants. Il est donc nécessaire de trouver des commandes permettant d'induire une bonne robustesse ainsi qu'une stabilité convenable. De plus il existe des ondulations de couple ainsi que des bruits acoustiques qu'il est nécessaire de corriger.

## 2.2 Fonctionnement de la MRV

Le principe de base d'une MRV est l'alimentation des phases d'un stator dans le but d'induire un mouvement du rotor. Toutes ces phases sont reliées indépendamment les unes des autres. En effet, cela permet de faire tourner le moteur continuellement même en cas de panne. La vitesse et les performances seront dégradées mais permettront de garder un moteur en marche et ainsi ne pas provoquer la perte de l'avion dans notre cas.

Les phases du stator sont alimentées séquentiellement et ainsi entrainera la rotation du rotor dans un sens dépendant de l'ordre d'alimentation des phases via un champ induit. Le couple moteur est fourni par la partie mobile, le rotor, lors de son déplacement vers une phase d'inductance magnétique maximale. En effet, le champ induit par le courant électrique fourni au stator fait bouger le rotor. Il peut avoir différentes positions : une position d'opposition (inductance minimale), intermédiaire ou de conjonction (inductance maximale). Ces positions peuvent être retrouvées dans la Figure 1.

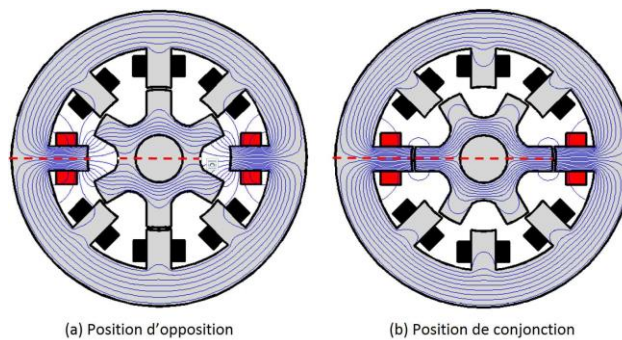


Figure 1 – position du rotor par rapport au stator

Comme précisé ci-dessus, lorsque le stator et le rotor sont en opposition de phase, une inductance minimale est induite. En effet, le flux créé par le courant électrique passe principalement par l'entrefer. En regardant la Figure 2 pour une phase du stator, c'est le cas entre 0 et  $\theta_1$  puis entre  $\theta_4$  et  $\theta_1$ . Il y a alors aucune production de couple. Cependant, lors des périodes de conjonction, le flux passe dans le rotor. L'inductance est donc maximale. C'est le cas entre  $\theta_2$  et  $\theta_3$ .

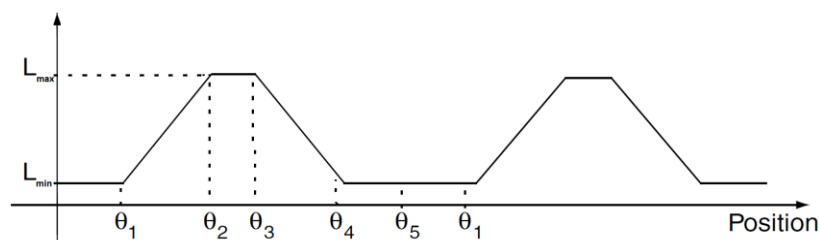


Figure 2 – inductance selon la position du rotor selon une phase

C'est donc sous ce fonctionnement que le couple moteur est induit : lors du passage d'une phase d'opposition à une phase de conjonction c'est à dire lors de la phase intermédiaire (entre  $\Theta_1$  et  $\Theta_2$ ) si la phase est alimentée.

La MRV doit avoir un minimum de 3 phases. Le modèle électromagnétique est le suivant et peut être modélisé par la Figure 3 :

$$\begin{cases} \Omega = \frac{d\theta_e}{dt} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em}(\theta_e, i_j) - C_{sec} - C_{ch} - f \cdot \Omega) \\ \frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_{inc_j}(\theta_e, i_j)} (v_j - R \cdot i_j - E_j) \end{cases}$$

$$\text{Avec : } L_{inc_j} = L_j(\theta_e, i_j) + i_j \frac{\partial L(\theta_e, i_j)}{\partial i_j}$$

$$E_j = i_j \cdot \Omega \frac{\partial L_j(\theta_e, i_j)}{\partial \theta_e}$$

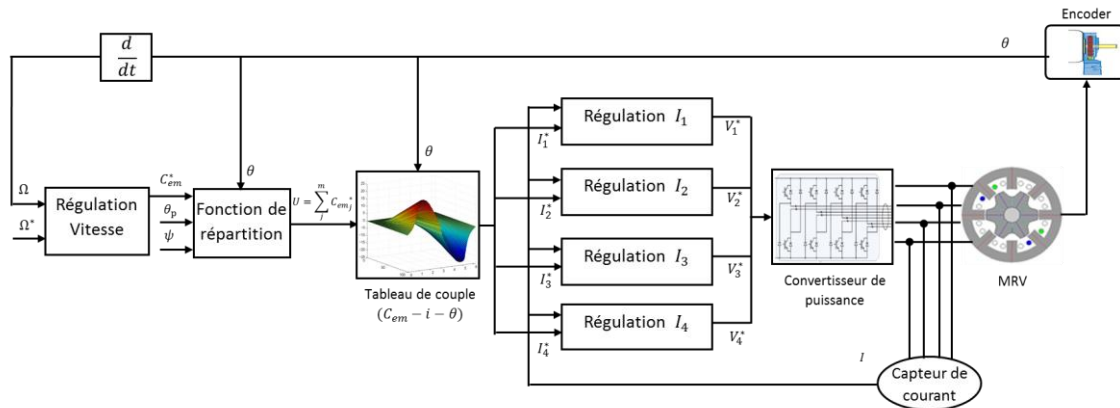


Figure 3 – modélisation de la MRV

### 2.3 Fonctionnement de la MRV sans capteur : principe d'ajout d'un observateur

Afin d'asservir et de commander la machine, il est nécessaire de connaître la position du rotor ainsi que sa vitesse de rotation. Or dans le cas de cette étude, le capteur réalisant cette fonction de renvoi au moteur est absent. Ce capteur peut être absent pour différentes raisons : la panne totale de celui-ci ou tout simplement la volonté de s'en affranchir afin d'augmenter la fiabilité mais aussi diminuer le coût et l'encombrement. Un observateur permettant de retrouver la position et la vitesse de rotation doit donc être ajouté dans le cas

où le capteur serait absent ou en panne. Pour gérer le cas de la panne, une commande FTC peut également être implémentée. Cette commande sera expliquée dans la quatrième partie de ce rapport.

L'observateur doit être modélisé comme suit (Figure 4) :

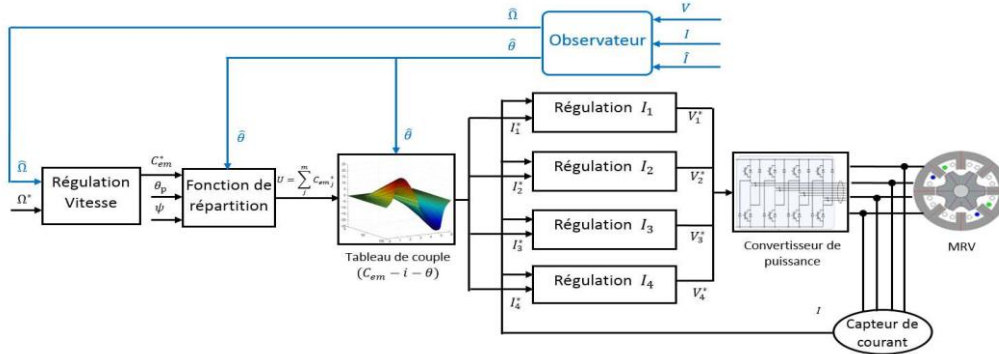


Figure 4 – modélisation de la MRV avec observateur

### 3 Remplacement du capteur manquant par un observateur

#### 3.1 Observateur par mode glissant

##### 3.1.1 Théorie

Plusieurs commandes existent, comme la commande non linéaire stabilisante « Backstepping » qui permet de piloter un système tout en assurant sa stabilité. Cette commande est basée sur la représentation d'état non linéaire, et elle utilise le principe de la stabilité asymptotique de Lyapunov.

La commande par mode glissant (Sliding mode control) qui est une commande non linéaire robuste. Elle consiste à maintenir des trajectoires d'état au voisinage d'une surface prédéfinie (surface de glissement). Ce maintien se traduit par des communications de la commande de part et d'autre de la surface de glissement.

Considérons un système défini comme suit :

$$\dot{x} = f(x) + g(x).u$$

Ainsi qu'une surface  $S = \varepsilon = x - x_{ref}$  et  $V = \frac{1}{2}.S^2$ , définie positive

Le but va être de dériver la surface de glissement pour faire apparaître la commande  $u$ . Il sera ensuite possible de déterminer la valeur de cette commande telle que la dérivée de la surface de glissement s'annule, ce qui crée un signal de sortie proche la référence.

$$\begin{cases} \dot{V} = S.\dot{S} \\ \dot{S} = \dot{\varepsilon} = \dot{x} - \dot{x}_{ref} \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dot{S} = f(x) + g(x).u - \dot{x}_{ref} \\ \dot{V} = S. [f(x) + g(x).u - \dot{x}_{ref}] \end{cases}$$

Cherchons désormais  $\dot{V}$  définie négative :

$$S.\dot{S} \leq S. [f(x) + g(x).u - \dot{x}_{ref}] \leq 0$$

Ainsi  $S$  et  $\dot{S}$  sont de signe opposé et  $S = \epsilon$  tend vers 0 en un temps fini.

$$\begin{cases} f(x) + g(x).u - \dot{x}_{ref} < 0 \text{ pour } S < 0 \\ f(x) + g(x).u - \dot{x}_{ref} = 0 \text{ pour } S = 0 \\ f(x) + g(x).u - \dot{x}_{ref} > 0 \text{ pour } S > 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} u > U_{eq} \text{ pour } S < 0 \\ u = \frac{\dot{x}_{ref} - f(x)}{g(x)} = U_{eq} \text{ pour } S = 0 \\ u < U_{eq} \text{ pour } S > 0 \end{cases}$$

Synthétisons une commande  $u$  qui est vraie pour chacune des conditions précédentes :

$$u = U_{eq} - k.\text{sign}(S) \text{ pour } k > 0$$

Il est possible aussi d'appliquer un super Twisting, pour plus de précision tel que :

$$\dot{u} = \begin{cases} -u \text{ si } |u| > |U_{eq}(t, X)| \\ -k_m \text{sign}(S) \text{ si } S\dot{S} \leq 0 \text{ et } |u| \leq |U_{eq}(t, X)| \\ -k_M \text{sign}(S) \text{ si } S\dot{S} > 0 \text{ et } |u| \leq |U_{eq}(t, X)| \end{cases}$$

$$\text{Avec } k_m > \frac{4 C_M}{S_0} \text{ et } k_M > \frac{4 C_M k_m}{C_m} + 2 \frac{C_0}{C_m}$$

### 3.1.2 Mise en équation du capteur de position par mode glissant

Il sera proposé un observateur par mode glissant d'ordre deux afin de remplacer le capteur de position et de vitesse du rotor de la MRV. Pour ce faire, les informations concernant la MRV étudié dans [1] seront utilisées. Une première hypothèse sera faite : la dynamique mécanique de la MRV est plus lente que celle des grandeurs électriques. Cela permet de considérer la vitesse constante par morceaux aux vues des grandeurs électriques.

L'équation (1) suivante présente les équations dynamiques décrivant le modèle non linéaire de la MRV :

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{inc}(\theta, i_j)} (v_j - R \cdot i_j - E) \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em}(\theta, i) - C_{ch} - f \cdot \Omega) \end{cases} \quad (1)$$

Dans cette équation,  $C_{em}$  représente le couple électromagnétique,  $C_{ch}$  le couple de charge. Enfin,  $f$  représente les frottements visqueux,  $R$  la résistance interne et  $J$  l'inertie du moteur. A partir de cette relation, les équations relatives aux grandeurs estimées sont déterminées.

L'équation (2) suivante présente les estimations de position et vitesse de rotation de la MRV expliquées dans la thèse [1].

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\theta}}{dt} = \hat{\Omega} + K_{\Omega} \cdot |e|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sign}(e) \\ \frac{d\hat{\Omega}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (\widehat{C_{em}} - \widehat{C_{ch}} - f \cdot \hat{\Omega}) + K_{\Omega} \cdot \text{sign}(e) \end{cases} \quad (2)$$

Où  $K_{\Omega}$  et  $K_{\theta}$  sont les gains de l'observateur qui impose la dynamique de l'erreur d'observation de la surface de glissement. Les grandeurs  $\hat{x}$  sont les estimations des grandeurs  $x$ .

Les erreurs choisies dans le mode glissant sont :

$$\begin{cases} e_{\theta} = \theta - \hat{\theta} \\ e_{\Omega} = \Omega - \hat{\Omega} \end{cases}$$

D'après [1], en prenant comme surface de glissement l'erreur d'observation de la position ( $S = e_{\theta}$ ) qui dépend de l'erreur d'observation de la vitesse de rotation  $e_{\Omega}$ , et en choisissant  $K_{\Omega}$  suffisamment grand, l'équation suivante est obtenue. Cette équation (3) présente la dynamique des erreurs d'observation après simplifications.

$$\begin{cases} \frac{de_{\theta}}{dt} = e_{\Omega} + K_{\theta} \cdot |e|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sign}(e) \\ \frac{de_{\Omega}}{dt} = -K_{\Omega} \cdot \text{sign}(e) \end{cases} \quad (3)$$

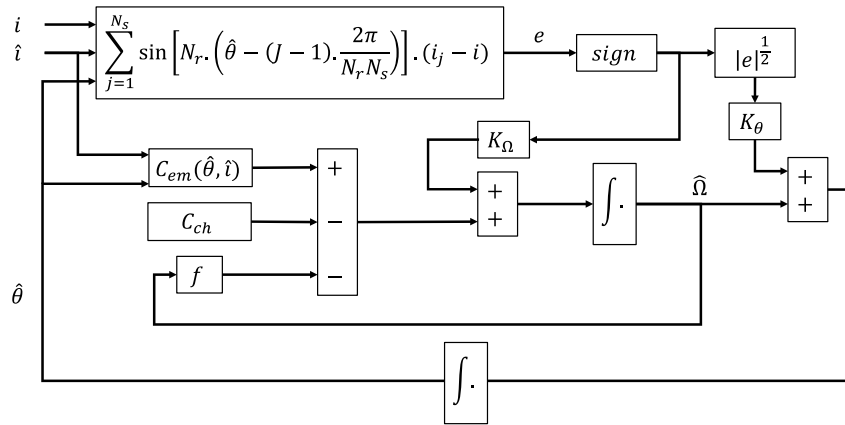
Pour satisfaire la condition d'attractivité  $S\dot{S} < 0$ , il faut, d'après l'équation (3), que l'erreur  $e$  soit du même signe que  $e_{\theta}$ , et que  $K_{\theta} > |e_{\Omega}|$ . Les erreurs,  $e_{\theta}$  et  $\dot{e}_{\theta}$  sont donc de signes opposés. Ainsi, l'erreur de position,  $e_{\theta} = S$ , tend vers zéro en un temps fini. L'erreur d'observation de la vitesse  $e_{\Omega}$  converge ensuite exponentiellement vers zéro.

D'après [2], l'erreur  $e$  présente dans les équations précédentes et satisfaisant cette condition est définie suivant l'équation (4).

$$e = \sum_{j=1}^{N_s} \sin \left[ N_r \left( \hat{\theta} - (j-1) \cdot \frac{2\pi}{N_r \cdot N_s} \right) \right] \cdot (i_j - \hat{i}_j) \quad (4)$$

Où  $i_j$  et  $\hat{i}_j$  sont respectivement les courants de référence et estimé de la phase  $j \in [1; 4]$ . Les paramètres  $N_r$  et  $N_s$  sont respectivement le nombre des pôles du rotor ( $2 \times 3$ ), et de phases de la MRV (4).

Les équations précédentes permettent de déterminer le schéma bloc de l'observateur par mode glissant d'ordre deux, utilisé pour remplacer le capteur, présenté par la Figure 5.



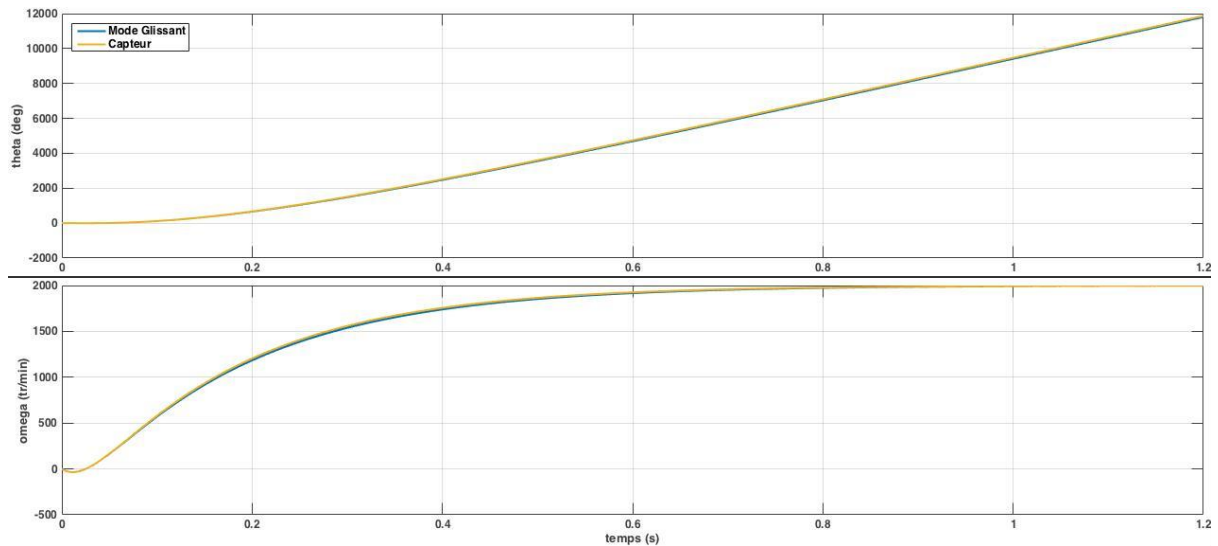
**Figure 5 – schéma bloc de l'observateur par mode glissant de la vitesse et position de la MRV**

Les intensités de chaque phase sont calculées par le bloc « MRVDS » en amont du capteur dans le bloc « MRV 8/1 » du Simulink de la MRV.

### 3.1.3 Implémentation sous Simulink du capteur dans une MRV PI/MG

Le schéma block présenté en Figure 5 est implémenté dans la partie « MRVDS 8/1 » en remplacement du capteur « MAfAcanonique2 ». En prenant comme entrée les courants estimés et de références de chaque phase avec le couple résistant, l'observateur est capable de fournir en sortie le couple moteur, la position angulaire et la vitesse de rotation de la MRV. La vitesse de rotation est ensuite réinjectée dans le système. Les régulations en vitesse et courant sont effectuées par des correcteurs de type PI. Les valeurs des gains retenues pour cette expérience sont  $K_\Omega = 0,01$  et  $K_\theta = 0,001$ .

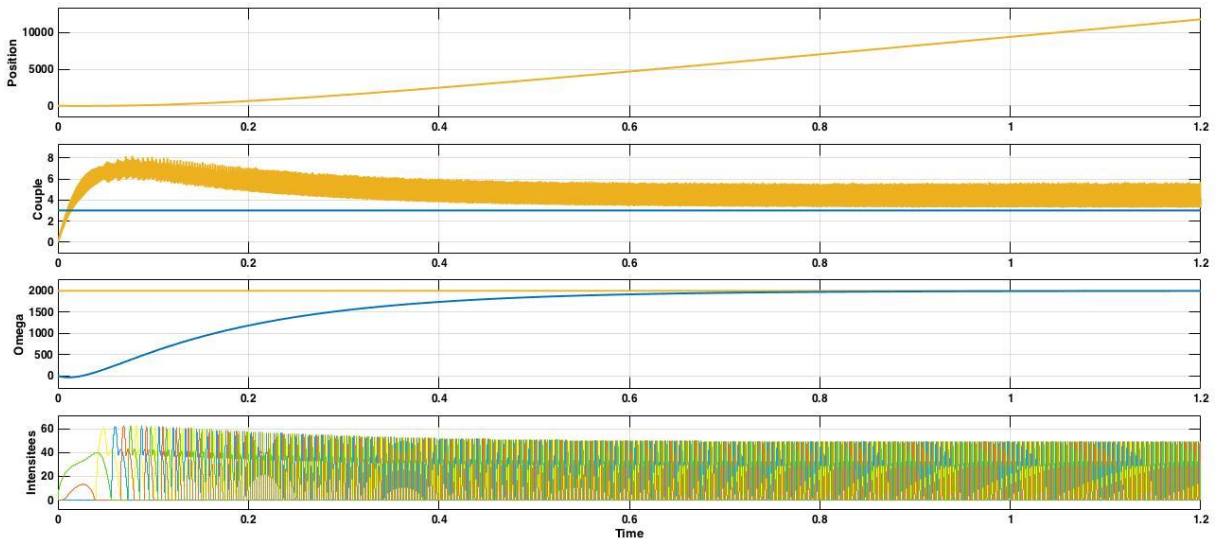
La Figure 6 montre l'évolution de la vitesse de rotation et de la position angulaire du rotor, avec et sans capteur.



**Figure 6 – comparaison avec et sans capteur de la vitesse et position du rotor**

Cette figure montre que l'observateur par mode glissant est très performant, et présente une réponse très proche de celle du capteur. Les paramètres de gains  $K_\Omega$  et  $K_\theta$  ont donc bien été choisis.

La Figure 7, représente l'ensemble des paramètres qui entrent et sortent de l'observateur par mode glissant remplaçant le capteur (avec correcteur PI).

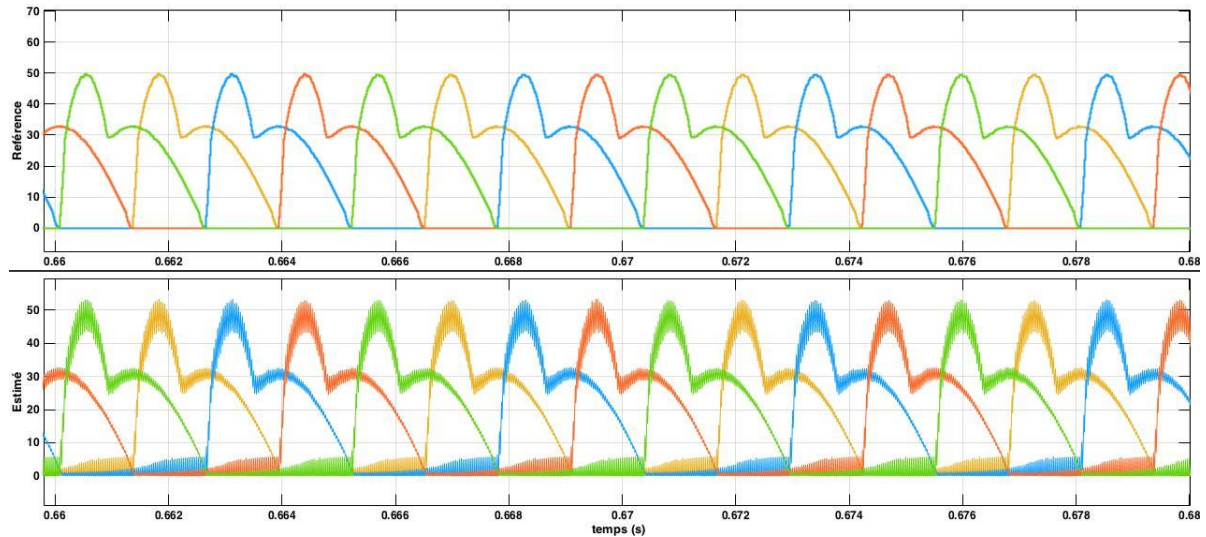


**Figure 7 – Paramètres relatifs au comportement de la MRV PI/MG sans capteur**

Cette figure reprend l'évolution de la position du rotor, la vitesse angulaire, le couple fourni ainsi que l'intensité de référence aux cours du temps. On remarque que l'observateur remplaçant le capteur, permet de répondre aux exigences demandées. Le couple résistant est

compensé par le couple moteur. La vitesse de rotation se stabilise vers 2000tr/min. les intensités de phase se stabilisent à une amplitude de 50A.

Le courant de référence et estimé de chaque phase est représenté par la Figure 8.



**Figure 8 – évolution des courants de chaque phase de la MRV PI/MG en régime permanent**

En régime permanent, le courant estimé suit bien la référence établie, avec une légère oscillation de faible amplitude. Les différentes intensités sont bien séquencées. Il n’y a pas de chevauchement qui pourrait être induit par un retard ou une mauvaise lecture de l’observateur par mode glissant.

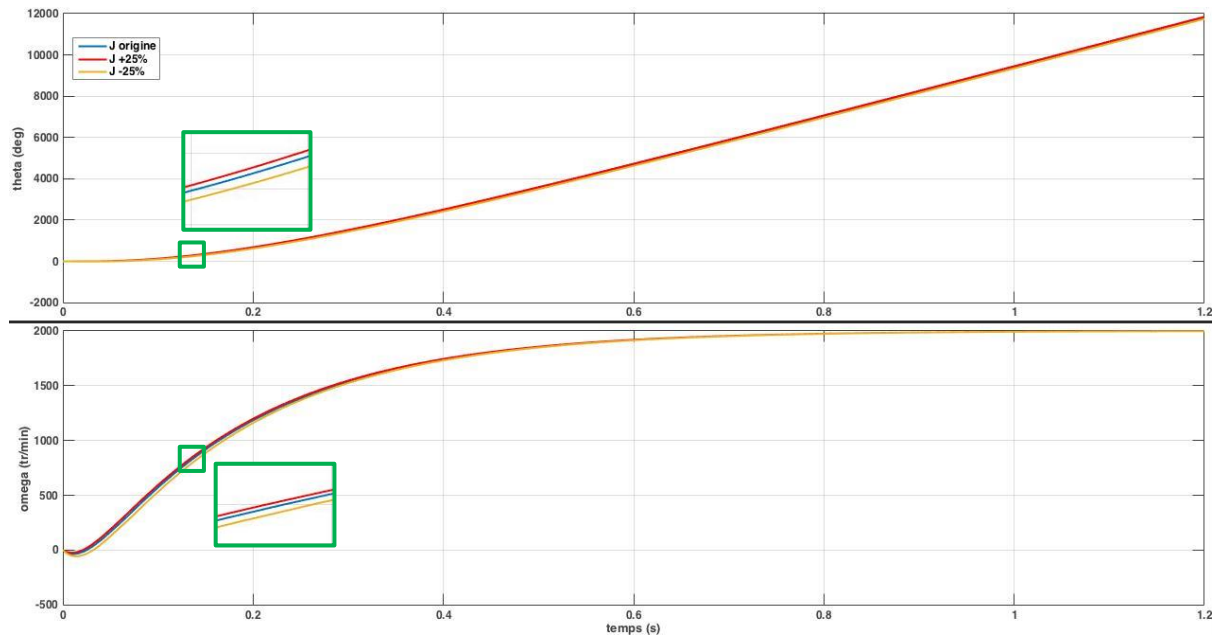
Au vu des différentes figures, l’observateur développé en remplacement des capteurs pourrait être utilisé dans une machine à réluctance variable PI/MG.

### **3.1.4 Test de la robustesse dans le cas d’une MRV PI/MG**

Une fois intégré au système, des tests sur la robustesse de l’observateur par mode glissant sont effectués. Les régulations en vitesse et courant sont effectuées par des correcteurs de type PI.

Deux études sur la robustesse ont été faites ici. Dans un premier temps, le comportement de l’observateur sera étudié pour plusieurs inerties  $J$ , et pour plusieurs résistances internes  $R$  dans un second temps.

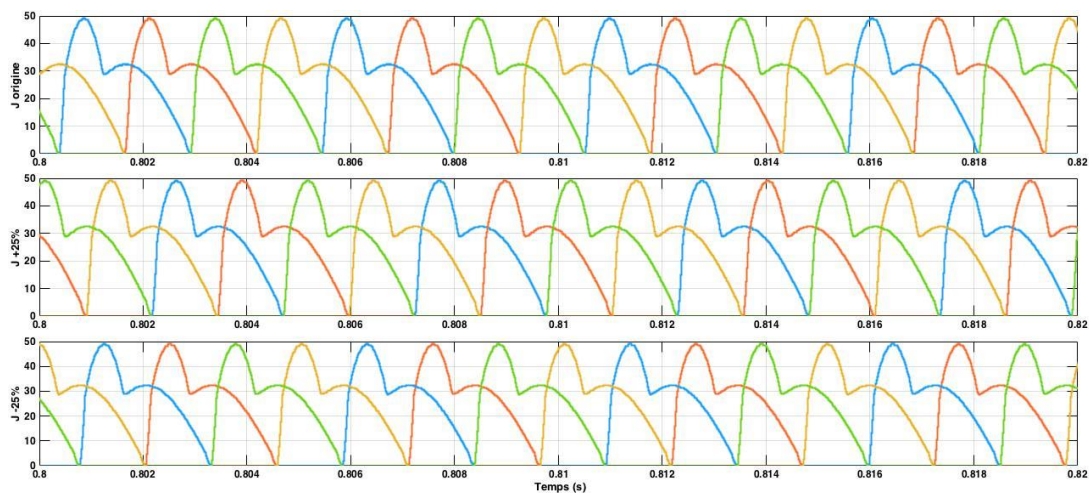
La Figure 9 reprend les positions et vitesses déterminées par l’observateur pour différentes inerties.



**Figure 9 – Position et vitesse pour différentes inerties, MRV PI/MG**

L'observateur est robuste par rapport à l'inertie, car les courbes sont sensiblement les mêmes en régime permanent. Quelle que soit l'inertie choisie, la machine arrive bien à compenser le changement et à tenir les mêmes performances de vitesse.

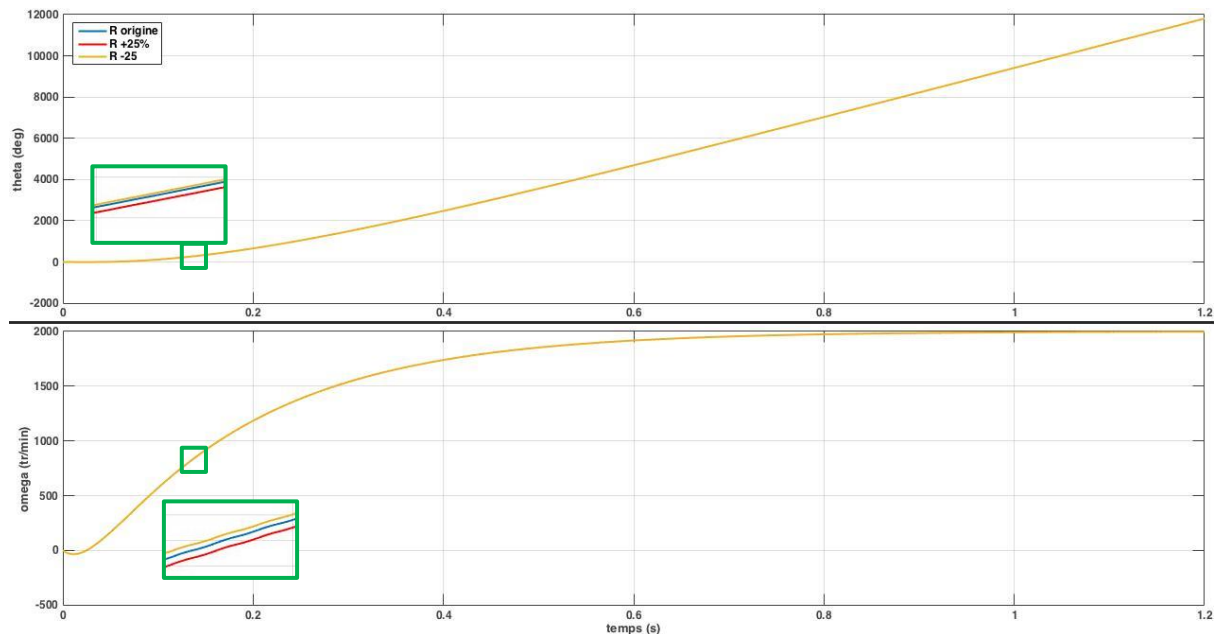
Concernant les intensités de chaque phase, la Figure 10 présente les différents cas.



**Figure 10 – Intensité de chaque phase pour différentes inerties**

Cette figure montre qu'en régime permanent, les intensités ont la même amplitude, mais un léger décalage s'est effectué par rapport à l'inertie d'origine. Ce décalage vient du fait que le régime transitoire est différent avec la valeur de l'inertie.

Concernant la robustesse par rapport à la valeur de la résistance interne  $R$ , la Figure 11 présente les différents cas possibles.



**Figure 11 – Position et vitesse pour différentes résistances internes, MRV PI/MG**

En régime transitoire ou permanent, la valeur de la résistance interne a quasiment aucun effet sur la dynamique de la vitesse et de la position du rotor.

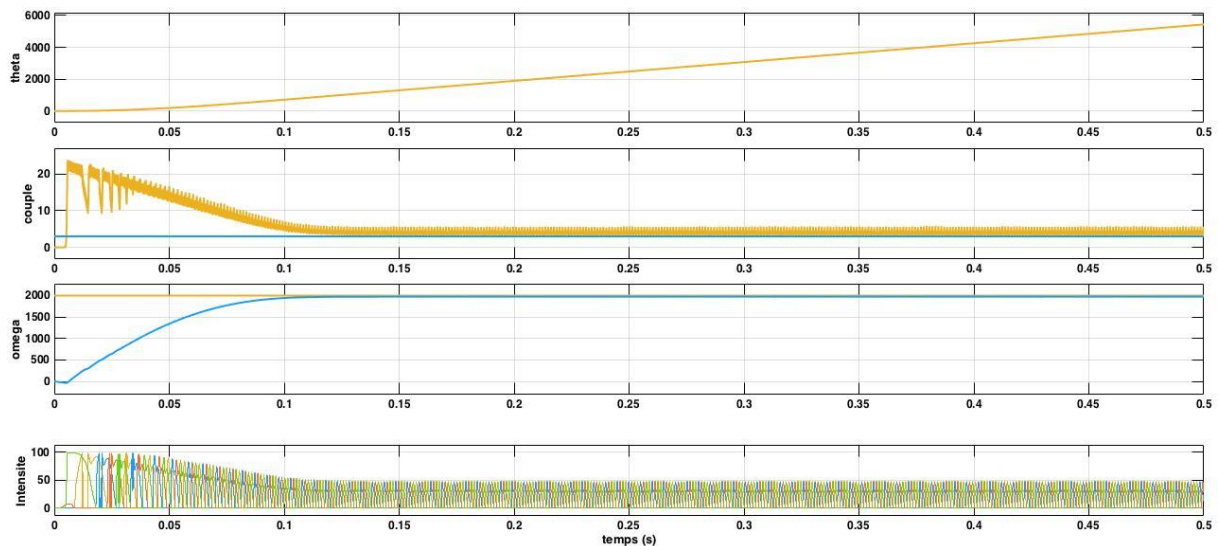
L'étude effectuée ici, montre que l'observateur par mode glissant qui a été développé et implémenté dans une MRV PI/MG est robuste par rapport à l'inertie et à la résistance interne.

### 3.1.5 Implémentation sous Simulink du capteur dans une MRV MG/MG

Dans cette partie, le même observateur a été implémenté au même endroit mais cette fois ci, dans une MRV où les régulations en vitesse et courant sont effectuées par des correcteurs de type mode glissant d'ordre 2 (Super Twisting). Les paramètres de gains sont les mêmes.

La Figure 12, représente l'ensemble des paramètres qui entrent et sortent de l'observateur par mode glissant remplaçant le capteur (avec correcteur Super Twisting).

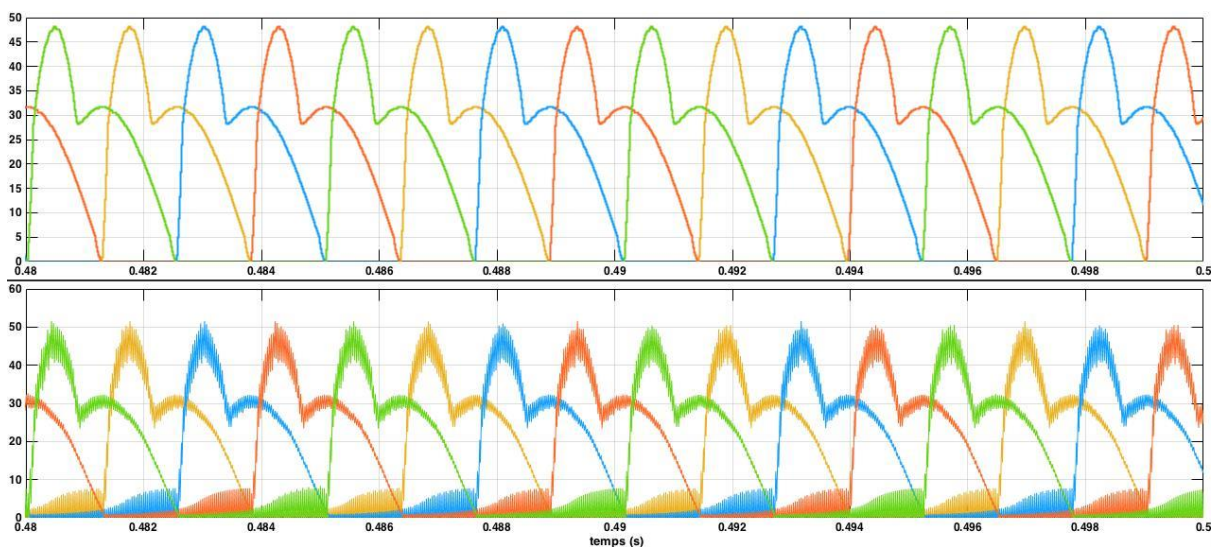




**Figure 12 – Paramètres relatifs au comportement de la MRV MG/MG sans capteur**

Cette figure reprend l'évolution de la position du rotor, la vitesse angulaire, le couple fourni ainsi que l'intensité de référence au cours du temps. Comme dans le cas de la MRV PI/MG, l'observateur remplaçant le capteur permet de répondre aux exigences demandées. Le couple résistant est compensé par le couple moteur. La vitesse de rotation se stabilise vers 2000tr/min mais en un temps plus court. Les intensités de phase se stabilisent à une amplitude de 48A, plus faible que pour une MRV PI/MG en régime permanent. Cependant, pour lancer la machine, en régime transitoire le courant monte à saturation (100A) contrairement à la MRV PI/MG (60A). Une amélioration des performances des correcteurs, responsable de la régulation de courant, sont nécessaires pour pallier à ce problème.

Le courant de référence et estimé de chaque phase est représenté par la Figure 13.



**Figure 13 – évolution des courants de chaque phase de la MRV MG/MG en régime permanent**



En régime permanent, le courant estimé suit bien la référence établie mais avec une légère oscillation de faible amplitude. Ces oscillations sont plus fortes que le cas de la MRV PI/MG. Ceci s'explique par l'utilisation de mode glissant pour réguler le courant. Les différentes intensités sont bien séquencées. Il n'y a pas de chevauchement qui pourrait être induit par un retard ou une mauvaise lecture de l'observateur par mode glissant.

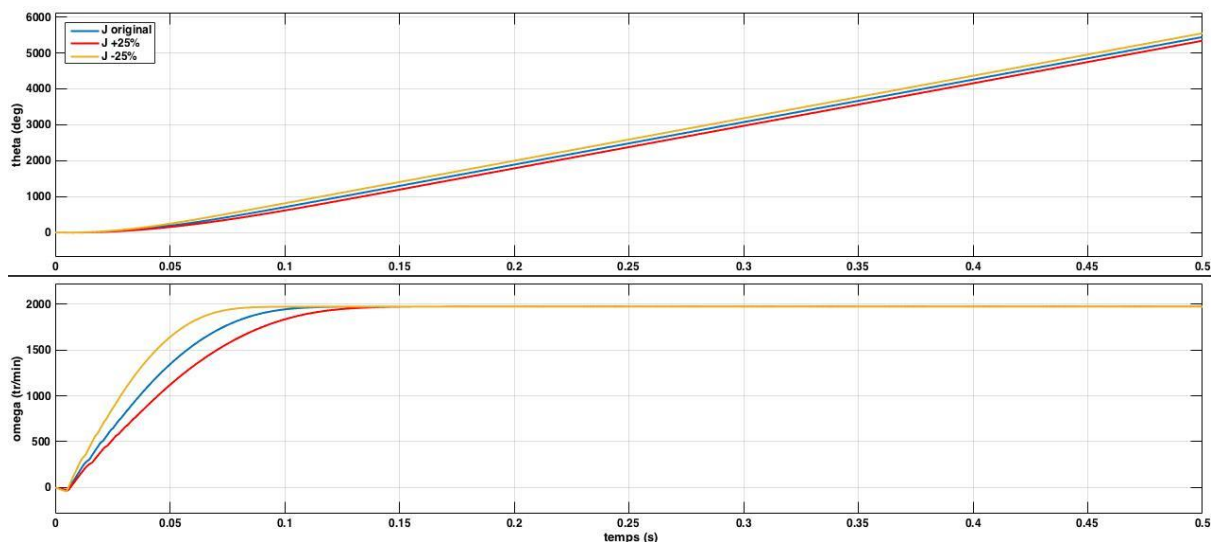
Au vu des différentes figures, les valeurs de gains  $K_\Omega$  et  $K_\theta$  sont bien choisis et l'observateur développé en remplacement des capteurs pourrait être utilisé dans une MRV MG/MG.

### 3.1.6 Test de la robustesse

Comme dans la partie 3.1.4, des tests sur la robustesse de l'observateur par mode glissant sont effectués. Les régulations en vitesse et courant sont effectuées par des correcteurs de type mode glissant d'ordre deux (Super Twisting).

Deux études sur la robustesse ont été faite ici. Dans un premier temps, le comportement de l'observateur sera étudié pour plusieurs inerties  $J$ , et pour plusieurs résistances interne  $R$ , dans un second temps.

La Figure 14 reprend les positions et vitesses déterminées par l'observateur pour différentes inerties.

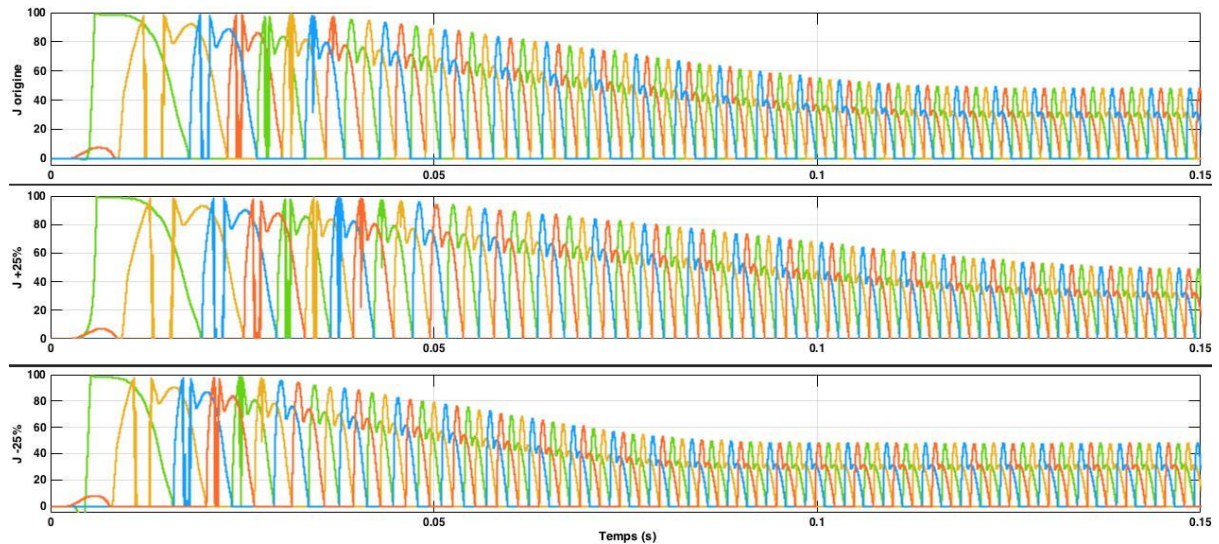


**Figure 14 – Position et vitesse pour différentes inerties, MRV MG/MG**

L'observateur est robuste par rapport à l'inertie car les courbes sont sensiblement les mêmes en régime permanent. Quelle que soit l'inertie choisie, la machine arrive bien à compenser le changement et arrive à tenir les mêmes performances de vitesse. En revanche, un changement d'inertie affecte beaucoup plus le régime transitoire. La MRV présente des difficultés à ce niveau pour tenir les performances car le courant des phases sature à 100A.

Cette saturation empêche la MRV de délivrer un couple suffisant. Avec l'inertie, la machine a donc plus de mal à se mettre en route et la vitesse de rotation en régime transitoire diminue.

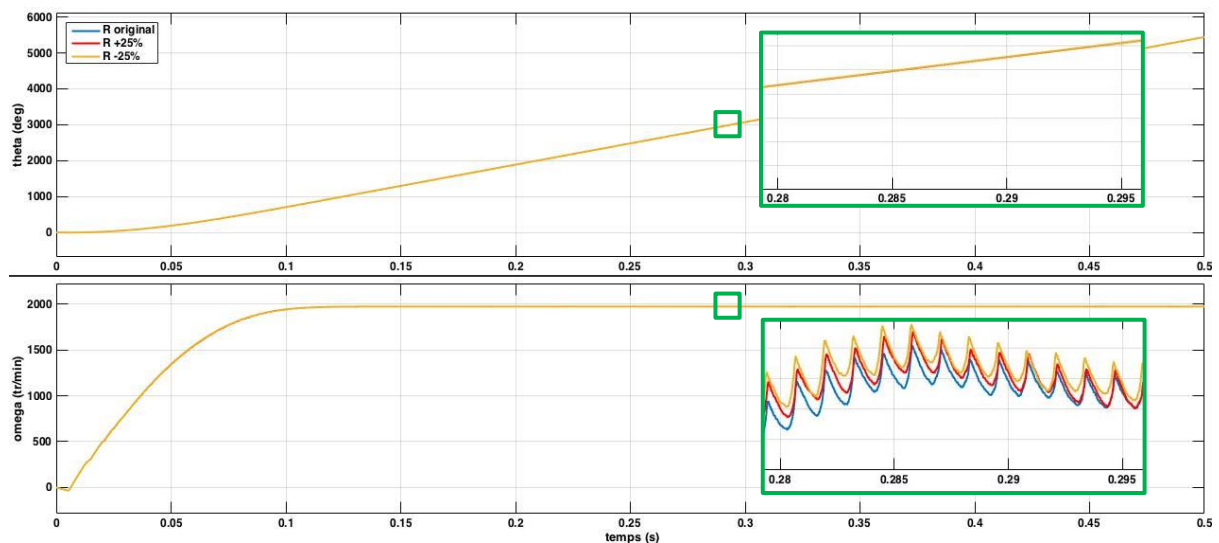
Concernant les intensités de chaque phase, la Figure 15 présente les différents cas.



**Figure 15 – Intensité de chaque phase pour différentes inerties**

Cette figure illustre bien ce qui a été expliqué précédemment. La durée du régime transitoire augmente avec l'inertie, ce qui est due à la présence d'une saturation à 100A qui empêche la MRV d'avoir un couple conséquent.

Concernant la robustesse par rapport à la valeur de la résistance interne R, la Figure 16 présente les différents cas possibles.



**Figure 16 – Position et vitesse pour différentes résistance internes, MRV MG/MG**

En régime transitoire ou permanent, la valeur de la résistance interne à quasiment aucun effet sur la dynamique de la vitesse et de la position du rotor.

L'étude effectuée ici, montre que l'observateur par mode glissant qui a été développé et implémenté dans une MRV MG/MG est robuste par rapport à l'inertie (en régime permanent) et à la résistance interne.

## 3.2 Filtre de Kalman

### 3.2.1 Théorie

D'une façon générale, la fonction de filtrage consiste à estimer une information utile qui est polluée par un bruit. Le filtrage fréquentiel suppose qu'il existe une séparation entre les réponses fréquentielles du signal utile et du bruit. Par conséquent la création du filtrage consiste à trouver une fonction de transfert satisfaisant un gabarit sur le gain de sa réponse fréquentielle. Le filtre de Kalman vise à estimer de façon "optimale" l'état du système et à prédire son prochain état selon une approche statistique. Il peut aussi bien s'appliquer à un système linéaire qu'à un système non linéaire. C'est dans ce dernier cas, dont la MRV fait partie, que s'applique le Filtre de Kalman Etendu (FKE). Le filtre de Kalman est un estimateur et un observateur.

#### 1. Modèle de Kalman

Reprenons le modèle classique d'un système à représentation d'état auquel entrées déterministes  $u(t)$  et aléatoires  $w(t)$  et  $v(t)$  sont ajoutées. Supposons donc que le système perturbé peut être modélisé par le modèle d'état suivant appelé modèle de Kalman :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Mw(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{cases}$$

L'objectif du filtre de Kalman est d'estimer les états  $x(t)$  du système. Cet estimé, noté  $\hat{x}(t)$ , est la sortie primaire du filtre de Kalman.

#### 2. Estimateur Non biaisé

Un filtre de Kalman est un système dynamique avec 2 entrées vectorielles : la commande déterministe  $u$  et la mesure  $y$ , c'est-à-dire tous les signaux connus du système. L'état  $\hat{x}(t)$  (ou la sortie) de ce filtre est un estimé de l'état  $x$  du système. Soit, le système suivant définissant la représentation d'état de ce filtre :

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}}(t) &= A_f \hat{x}(t) + \begin{bmatrix} B_f & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \\ &= A_f \hat{x}(t) + B_f u(t) + K_f y(t)\end{aligned}$$

Bien entendu il faut initialiser ce filtre avec  $\hat{x}(t_0)$  : l'estimé de l'état du système à l'instant initial  $t_0$ .

Notons  $\epsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  l'erreur d'estimation de l'état du système et  $\epsilon(t_0) = x(t_0) - \hat{x}(t_0)$  l'erreur d'initialisation.

En retranchant les équations :

$$\begin{aligned}- \quad \dot{\epsilon} &= Ax + Bu + Mw - Af\hat{x}(t) - Bfu - Kf(Cx + Du + v) \\ \dot{\epsilon} &= (A - KfC)x - Af\hat{x}(t) + (B - Bf - KfD)u + Mw - Kfv \\ \dot{\epsilon} &= (A - KfC)\epsilon + (A - KfC - Af)\hat{x}(t) + (B - KfD - Bf)u + Mw - Kfv\end{aligned}$$

Il est nécessaire que la moyenne de l'erreur d'estimation tende vers 0 lorsque  $t$  tend vers l'infini.

Les bruits  $w$  et  $v$  étant centrés en 0, écrivons :

$$\begin{aligned}E[\dot{\epsilon}(t)] &= (A - KfC)E[\epsilon(t)] + (A - KfC - Af)E[\hat{x}(t)] + (B - KfD - Bf)u(t) \\ \text{Et } \lim_{t \rightarrow \infty} E[\epsilon(t)] &= 0\end{aligned}$$

Donc  $A_f = A - K_f D$  et  $B_f = B - K_f D$

Par conséquent  $\hat{\dot{x}}(t) = (A\hat{x}(t) + Bu) + K_f(y - C\hat{x}(t) - Du)$

Dans le premier terme du second membre de cette équation, peut être reconnu le modèle du système qui est exploité pour prédire l'évolution de l'état du système à partir de l'estimation courante  $\hat{x}(t)$ . Cette prédiction est en fait une simulation en ligne du modèle du système. Le modèle étant faux, la prédiction est recalée en fonction de l'erreur entre la mesure  $y$  et la mesure prédite  $\hat{y} = C\hat{x}(t) + Du$  et du gain du filtre  $K_f$ .

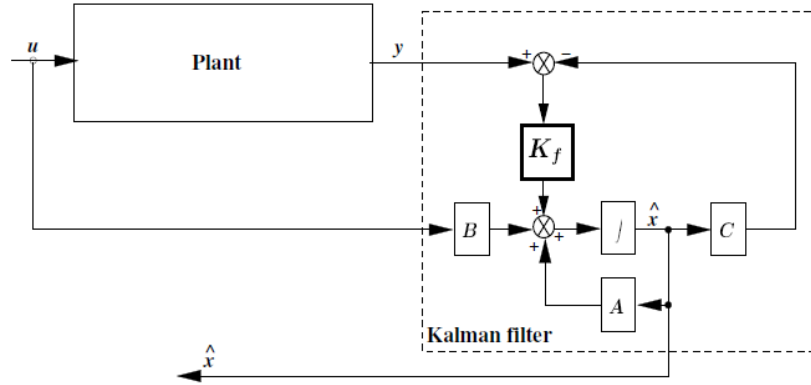


Figure 17 – Modèle de Kalman, estimateur non biaisé

### 3. Prédicteur

Lorsque est appliqué le filtre de Kalman dans un cas discret, il utilise, en plus, une prédiction qui s'appuie sur le modèle déterministe et un recalage de correction qui s'appuie sur l'innovation (c'est la différence entre la mesure et la sortie prédite). Cependant en discret seront distingués :

- L'état prédit à l'instant  $k+1$  connaissant toutes les mesures jusqu'à l'instant  $k$  noté  $\hat{x}(k+1|k)$  et auquel est associé la matrice de covariance de l'erreur de prédiction notée :

$$P(k+1|k) = E[(x(k+1) - \hat{x}(k+1|k))^2] \quad (5)$$

- L'état estimé connaissant la mesure à l'instant  $k+1$  (après le recalage) noté  $\hat{x}(k+1|k+1)$  auquel est associé la matrice de covariance de l'erreur d'estimation notée :

$$P(k+1|k+1) = E[(x(k+1) - \hat{x}(k+1|k+1))^2] \quad (6)$$

**Prédiction :** A l'instant  $k$ , est connu  $\hat{x}(k+1|k)$ . L'état à l'instant  $k+1$  est prédit en utilisant le modèle déterministe :

$$\hat{x}(k+1|k) = A\hat{x}(k|k) + Bu(k) \quad (7)$$

A l'instant  $k$ , l'erreur d'estimation était caractérisée par  $P(k|k)$ . L'erreur de prédiction à l'instant  $k+1$  sera caractérisée par :

$$P(k+1|k) = AP(k|k)A^T + MWM^T \quad (8)$$

$W$  étant la covariance du bruit d'état  $w(k)$ .

**Recalage de Correction** : A l'instant  $k+1$ , la prédiction est recalée avec l'innovation via le gain du filtre :

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K_f(k+1)(y(k+1) - C\hat{x}(t) - Du(t)) \quad (9)$$

Avec l'appui des formules (2) et (5) peut être défini :

$$P(k+1|k+1) = (I_n - K_f(k+1)C)P(k+1|k) \quad (10)$$

L'objectif est de minimiser la covariance et de déterminer le  $K_f$  qui en dépend, tel que

$$K_f(k+1) = P(k+1|k)C^T(CP(k+1|k)C + V)^{-1} \quad (11)$$

$V$  étant la covariance du bruit de mesure.

### 3.2.2 Mise en équation du capteur de position par la méthode de Kalman

Dans cette partie, une étude est faite quant au choix d'un observateur de Kalman pour remplacer le capteur de position et de vitesse du rotor de machine à réluctance variable. La méthode utilisée dans cette partie est celle développée dans [1] pour les EKF de MRV sans capteur.

Le fonctionnement non linéaire de la machine à réluctance variable impose l'utilisation d'un filtre de Kalman étendu discret pour observer l'état du système.

La Figure 18 reprend la structure du filtre qui sera implémenté dans le modèle Simulink.

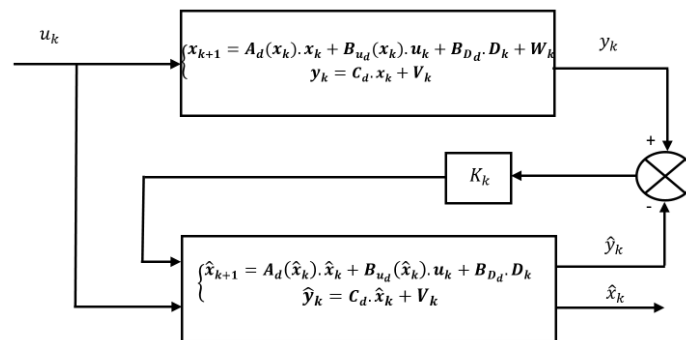


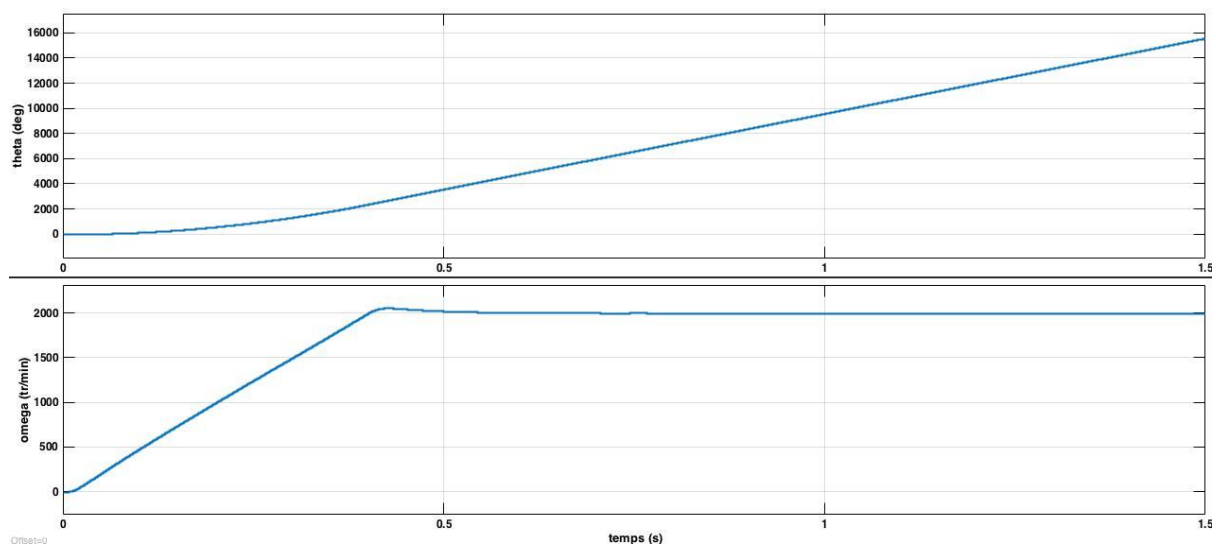
Figure 18 – Structure globale du filtre de Kalman étendu appliqué à la MRV

Dans cette figure  $K_k$  est le gain de Kalman, et les deux blocs correspondent à l'étape de prédiction (en haut) et l'étape de correction (en bas).

### 3.2.3 Implémentation

Le filtre de Kalman est ensuite implémenté dans les observateurs à la place du capteur de position angulaire et vitesse de rotation du rotor. En prenant comme entrées les courants/tensions estimés et de références de chaque phase avec le couple résistant, l'observateur est capable de fournir en sortie le couple moteur, la position angulaire et la vitesse de rotation de la MRV. La vitesse de rotation est ensuite réinjectée dans le système. Les régulations en vitesse et courant sont effectuées par des correcteurs de type PI.

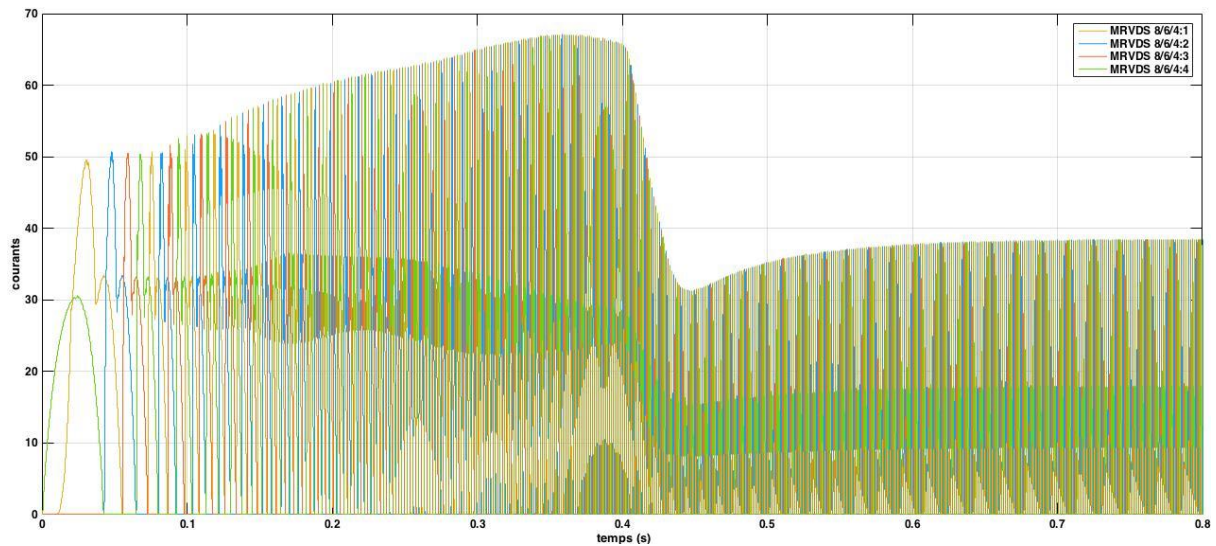
La Figure 19 montre l'évolution de la vitesse de rotation et de la position angulaire du rotor de la MRV.



**Figure 19 – Position et vitesse de rotation par utilisation d'EKF**

Cette figure montre que l'EKF remplaçant le capteur permet de répondre aux exigences demandées. La vitesse de rotation se stabilise rapidement vers 2000tr/min. Cependant, en régime transitoire, la vitesse monte trop rapidement, et un dépassement est présent juste avant la stabilisation.

Le courant de chaque phase en rapport avec le cas précédent, est représenté par la Figure 20.

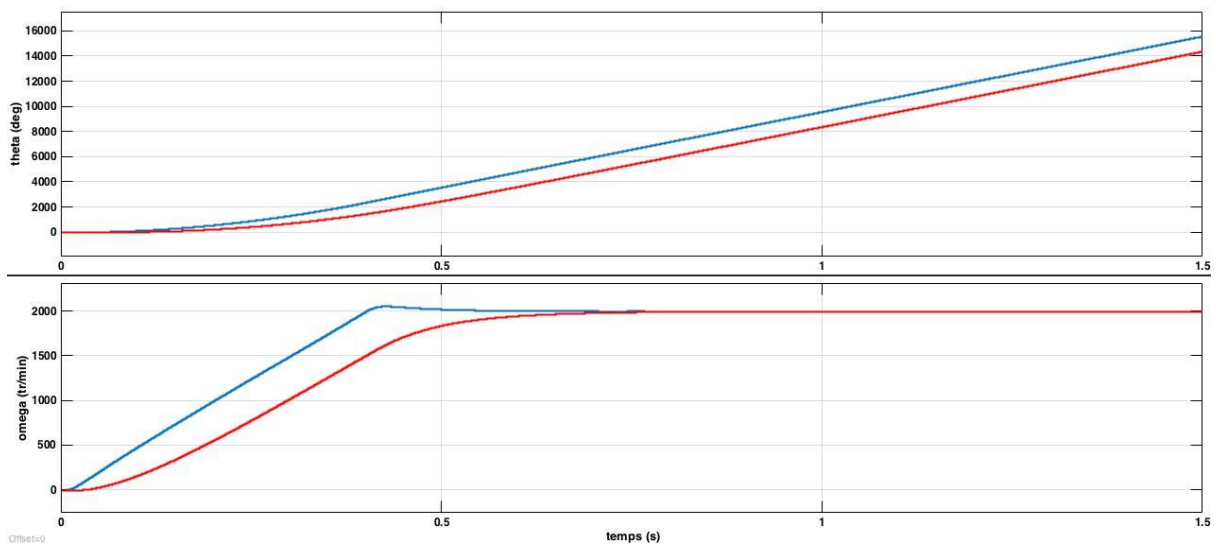


**Figure 20 – évolution du courant par l'utilisation d'un EKF**

Cette évolution est plutôt brutale : une forte demande pour lancer la machine (jusqu'à 65A), puis une chute pour stabiliser la machine au régime permanent. Ces brèves variations, peuvent endommager la machine et diminuer sa durée de vie.

Pour ajouter plus de souplesse, un filtre classique du premier ordre a été implémenté en entrée de consigne permettant de lisser un peu plus la dynamique de la vitesse de rotation du rotor.

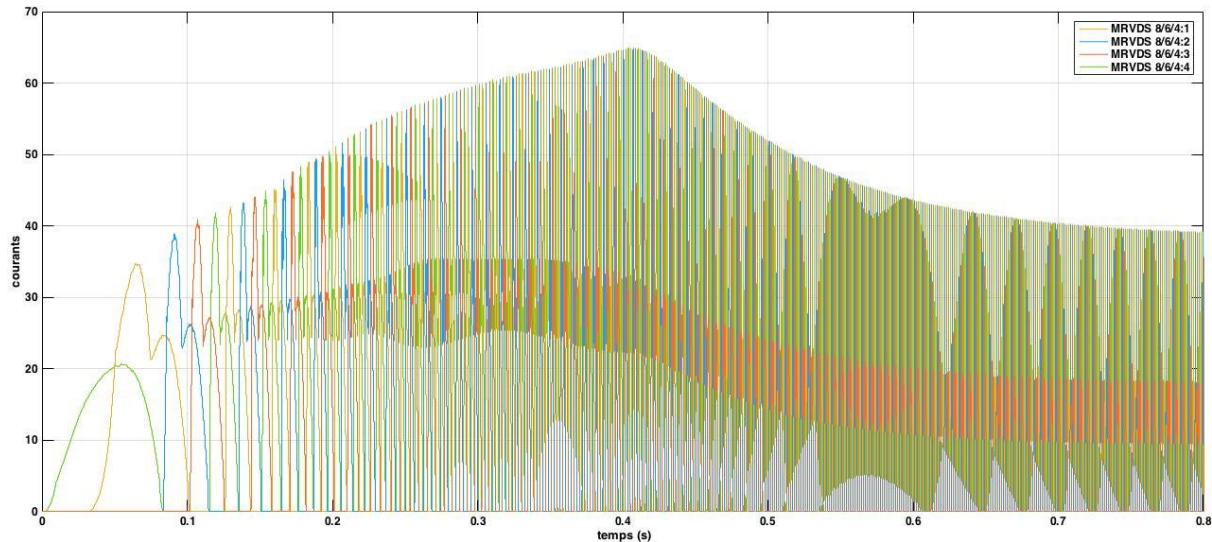
Les courbes rouges de la Figure 21 représentent la position angulaire et la vitesse de rotation du rotor avec un filtre en entrée de commande.



**Figure 21 – Position et vitesse de rotation par utilisation d'EKF avec filtre de commande**



Le courant de chaque phase, en rapport avec le cas précédent, est représenté par la Figure 22.



**Figure 22 – évolution du courant par l'utilisation d'un EKF avec filtre de commande**

L'évolution des courants est plus lisse, le couple demandé au moteur est plus faible ce qui permet moins de courant pour lancer la machine. Ainsi, il n'y a pas de déplacement au niveau de la vitesse.

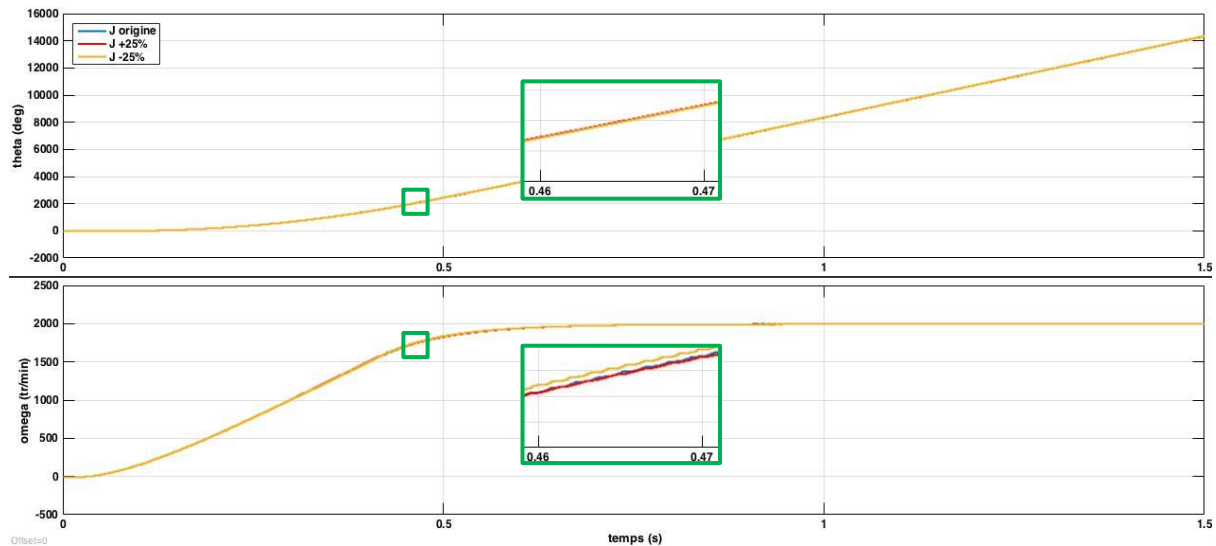
L'utilisation du filtre de Kalman pour remplacer les capteurs est également possible comme le prouve ces différentes figures. Les paramètres de vitesse sont satisfaits avec une bonne précision.

### **3.2.4 Test de robustesse**

Comme dans la partie 3.1.6, des tests sur la robustesse de l'observateur par méthode de Kalman sont effectués.

Dans ce paragraphe, le comportement de l'observateur sera étudié pour plusieurs inerties  $J$ .

La Figure 23 – Test de robustesse par rapport à l'inertie sur observateur de Kalman reprend les positions et vitesses déterminées par l'observateur pour différentes inerties.



**Figure 23 – Test de robustesse par rapport à l'inertie sur observateur de Kalman**

Cette figure montre que l'observateur par méthode de Kalman est très robuste par rapport à l'inertie. Quelle que soit la valeur de  $J$ , les courbes se superposent avec la même précision.

### 3.3 Comparaison des observateurs

Au vu des résultats des différentes études, le filtre de Kalman offre plus de précision et permet de satisfaire une consigne de vitesse avec plus de dynamisme que le mode glissant.

En termes de robustesse, l'observateur par la méthode de Kalman offre plus de robustesse que l'observateur par mode glissant d'ordre deux. Cette tenue des paramètres est préférable dans un domaine aéronautique où les contraintes liées à la sécurité sont de plus en plus forte.

L'utilisation d'un observateur par mode glissant offre moins de précision mais est plus simple à mettre en œuvre.

Néanmoins, les différents cas présentés dans ce rapport fonctionnent.

## 4 Commande FTC (Fault Tolerant Control)

Dans cette partie sera traitée l'utilisation, l'utilité et l'implémentation d'une commande tolérante aux défauts (FTC) pour la MRV avec observateur. Bien que ce point, aux vues de la complexité du projet et du temps alloué à celui-ci, aurait pu à ne pas être traité, une première étude du sujet et des axes de recherches ont et fournis.

Dans un premier temps, l'objectif d'une commande FTC dans une boucle de commande sera exposé, puis un état de l'art des solutions qui ont pu être proposées dans la littérature pour

des système non-linéaire sera relaté. Enfin, un début de réponse quant à l'implémentation d'une commande FTC pour notre MRV avec observateur sera proposé.

## **4.1 Objectif de la commande FTC**

Bien que les technologies d'asservissement et de commande des systèmes deviennent de plus en plus sûres et fines, garantir la fiabilité nécessaire pour des applications aéronautiques reste complexe. En effet, au-delà de la complexité des modèles et des technologies utilisées, garantir la tolérance à un défaut hardware (calculateur, carte électronique, etc...) ou software (Donnée Hors-Range, Calcul, etc...) reste un des challenges du milieu aéronautique.

L'intérêt de la commande FTC est de garantir, sur une boucle de commande, des marges de stabilité et de fiabilité suffisantes tout en conservant les meilleures performances possibles. On peut classer les technologies de commande FTC en deux types. La première étant l'approche passive. Elle consiste à intégrer la contrainte de tolérance au défaut dès le début du processus de développement en identifiant des défauts potentiels et en faisant les choix de développement nécessaire pour réduire leurs occurrences ou leurs impacts sur le système. Cette approche nécessitant une modification des technologies utilisées, il en résulte souvent une réduction des performances du système final. La seconde quant à elle se base sur une approche plus active de la tolérance au défaut. Elle consiste en une forme de « post-traitement » des différents outputs du système qui, par redondances, permet de lisser les impacts des différents défauts jusqu'à les annuler. Il est à noter que bien que cette approche n'impacte pas les choix de développement, plus la complexité des systèmes de contrôle augmente, plus celle des algorithmes de traitement des données et de tolérance aux défauts augmente également. Une commande FTC active permet donc théoriquement de garantir de meilleures performances de la boucle de contrôle mais amène une plus grande complexité de synthèse.

Dans cette étude l'approche AFTC (Active Fault Tolerant Control) sera utilisée en tirant partie des connaissances apprises lors du Bureau D'étude sur les réseaux de communication de ce début d'année. En effet, un algorithme de commande FTC pour des capteurs d'angles de gouvernes avaient été synthétisé.

## **4.2 Synthèse d'une commande FTC pour la MRV avec observateur**

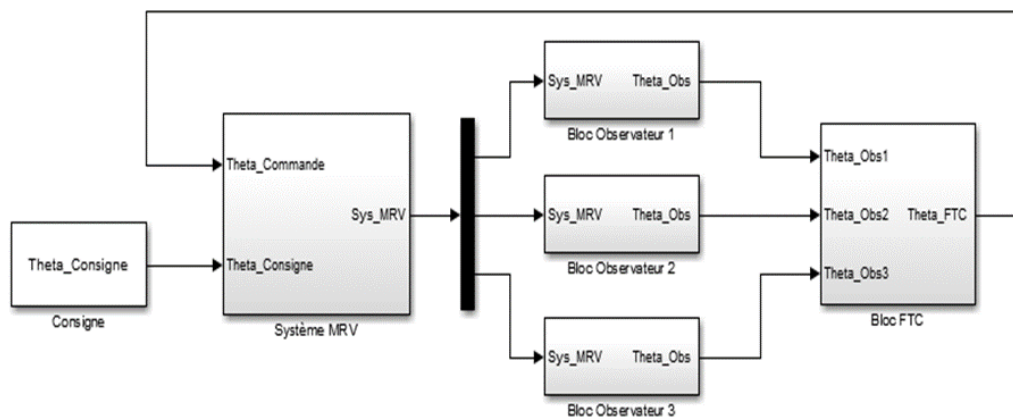
Dans cette partie, une solution pour la synthèse d'une commande FTC, relative aux observateurs implémentés précédemment, est proposée. Il s'agira de chercher une commande AFTC afin d'effectuer un « post-traitement » sur les outputs de l'observateur. Ceci permettra d'avoir une solution partielle à la tolérance au défaut.

Après avoir précédemment réalisé un travail similaire visant à synthétiser une commande FTC pour des capteurs de positions de gouvernes, l'AFTC sera basée sur un système de

redondances software et hardware et un algorithme de vote afin de lisser les défauts qui pourraient être liés à un calculateur en panne ou défaillant. Cependant cette solution ne permet pas de prévenir une erreur dans la synthèse de l'observateur, qui devra donc être garanti en amont.

Dans un premier temps, il est choisi de redonder trois fois l'observateur afin de permettre l'utilisation d'un algorithme de vote entre les outputs des trois calculateurs.

Il est à noter que l'utilisation de trois calculateurs pour l'algorithme de vote est le minimum requis pour cette technologie, une commande FTC optimale utilisant un algorithme de vote nécessiterait plus de redondances pour s'affranchir des hypothèses simplificatrices qui seront pris dans cette étude. Le but ici est de proposer une première solution pouvant servir d'axe de recherches pour une étude plus approfondie de la synthèse d'une commande FTC pour une MRV avec observateur.



**Figure 24 – redondance des observateurs**

Comme schématiser ci-dessus (Figure 24), cette commande AFTC consiste à placer un calculateur, en aval des trois observateurs redondés et ségrégués, qui embarque un algorithme de traitement des outputs des observateurs afin de lisser les écarts entre les résultats et détecter si un des observateurs est défaillant ou en panne.

Pour cette commande FTC, les hypothèses suivantes seront faites :

- Le calculateur embarquant l'algorithme de vote ne peut pas être défaillant.
- Si une panne ou une dégradation survient, l'hypothèse suivante sera faite : une seconde panne ne surviendra pas car la probabilité que deux pannes arrivent est suffisamment faible.

Ces hypothèses simplifient grandement le problème. Cependant il est à noter que s'affranchir de ces hypothèses nécessiterait simplement plus de redondances dans le système (qui complexifieraient le développement de l'algorithme de calcul). L'objectif ici étant de proposer une première solution la tolérance au défaut, prendre ces hypothèses permet de démontrer

la méthode de synthèse de la commande FTC en s'affranchissant du temps de développement que nécessiterait une algorithmique complexe.

Le bloc de commande FTC doit alors réaliser plusieurs fonctions :

#### **4.2.1 Vérifier le rafraîchissement des données en sortie des blocs observateurs**

D'un point de vue de la simulation, les contraintes de wiring et d'interface ne se posent pas. Cependant il faudrait intégrer une fonction permettant de vérifier la continuité et le rafraîchissement des données.

#### **4.2.2 Vérifier que l'observateur ne donne pas de données « Hors Range »**

L'étude du modèle de la MRV permet de définir une plage de valeurs attendues en sortie des observateurs. Il sera alors présent sur le bloc FTC des saturations sur les sorties des observateurs afin d'être capable de déceler les observateurs retournant des données « Hors Range ».

#### **4.2.3 Surveiller les fortes oscillations des signaux en sortie des observateurs.**

Un des comportements du signal pouvant faire preuve d'un défaut est : ses oscillations. En effet, les observateurs ont été dimensionnés afin de fournir de bonnes performances en stabilité. Les signaux, en régime établi, se veulent donc stables. Des « Rate Limiter » seront utilisés afin de voir si les signaux limités et les signaux de base sont différents.

#### **4.2.4 Utiliser un algorithme de vote pour détecter les dégradations des observateurs**

L'algorithme est implémenté une fois que les vérifications de stabilité et de rang sont effectuées. L'algorithme va, dans un premier temps, vérifier si les tests de rafraîchissement, range et stabilité sont remplis et retourner une erreur sinon. Dans un second temps, il va évaluer l'écart entre chaque signal de sortie des blocs observateurs et remonter une dégradation si une des sorties des blocs observateurs s'éloigne trop des autres. Il donnera alors comme signal de sortie la moyenne des signaux jugés « acceptable » par les marges d'écart que lui auront été fixé.

#### **4.2.5 Remonter les pannes à « l'utilisateur »**

A la suite de l'algorithme de vote on cherche alors à remonter les défauts qui seraient apparus. L'étude d'un moyen de display des erreurs sortant du cadre de l'étude, on se concentre sur la formalisation de statuts des différents signaux et création d'une variable de sortie contenant les différentes erreurs dues aux différents tests effectués.

On obtient alors l'architecture suivante du bloc FTC (Figure 25) :

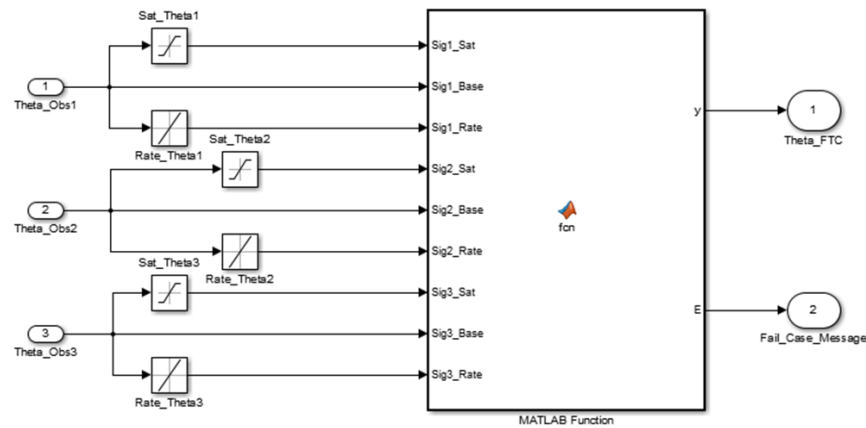


Figure 25 – bloc FTC

Le calculateur reçoit, pour chaque redondance d'observateur, le signal direct, le signal saturé et le signal stabilisé. Il peut donc réaliser les tests de range puis de stabilité avant de procéder à l'algorithme de vote.

L'algorithme de vote est alors structuré comme suit :

- 1) Test de Range : vérifie que le signal direct et le signal saturé sont les mêmes. Ceci prouve que la saturation n'influe pas sur le signal et qu'aucune donnée ne sort du range imposé.
- 2) Test de stabilité : vérifie que le signal direct et le signal passant dans le « Rate Limiter » sont les mêmes. Ceci prouve que le « Rate Limiter » n'influe pas sur le signal et que celui-ci à une faible dynamique et ainsi reste stable dans un intervalle fixé.
- 3) A partir des signaux non rejetés par les deux précédents tests, il est réalisé la différence deux à deux de chaque redondance d'observateur et vérifié qu'aucun ne retourne une valeur très écartée des deux autres. (NB : On a pris l'hypothèse qu'une seule panne peut survenir en même temps.)

L'algorithme retrouvé dans la *Matlab function* est donc le suivant :

```
function [y,E]= fcn(Sig1_Sat, Sig1_Base, Sig1_Rate,Sig2_Sat, Sig2_Base, Sig2_Rate,Sig3_Sat, Sig3_Base, Sig3_Rate)

%% Test de Range %%

%% Signal 1

%%Compare Sig1_Sat & Sig1_Base
Range_Sig1 = Simulink.sdi.compareSignals(Sig1_Base,Sig1_Sat)

%%Find if the signal match
match = Range_Sig1.match;

%%Set Signal status regarding Saturation test
if match == 1
    range_status_sig1 = 1
else
    range_status_sig1 = 0
end
```

Pour chaque signal ce test est effectué. Une variable représentative du résultat du test est créée. Le test de stabilité est implémenté de manière similaire.

```
%% Test de Stabilité %%  
  
%% Signal 1  
  
%%Compare Sig1_Rate & Sig1_Base  
Rate_Sig1 = Simulink.sdi.compareSignals(Sig1_Base,Sig1_Rate)  
  
%%Find if the signal match  
match = Rate_Sig1.match;  
  
%%Set Signal status regarding Saturation test  
if match == 1  
    rate_status_sig1 = 1  
else  
    rate_status_sig1 = 0  
end
```

Il s'ensuit l'étude des signaux jugés « valide » par le système. Par combinatoire sont calculées les différences entre les signaux :

1. Signal Observateur 1 et Signal Observateur 2
2. Signal Observateur 1 et Signal Observateur 3
3. Signal Observateur 2 et Signal Observateur 3

Un intervalle de tolérance sur est ensuite défini. Si dans une des limites de cette tolérance est franchie, le calcul est répété. Le signal présent dans les 2 résultats excédant la tolérance est donc dégradé.

```

%% Calcul différence signal
D12 = Sig1_Base - Sig2_Base
D13 = Sig1_Base - Sig3_Base
D23 = Sig2_Base - Sig3_Base

%% Définition Tolérance Delta
Tolerance_Delta_Sig = 0;

%% Recherche signal dégradé

%%A ce moment, tout les signaux sont jugé non-dégradé
degraded_status_sig1=1;
degraded_status_sig2=1;
degraded_status_sig3=1;

%% Signaux 1 & 2
if D12 > Tolerance_Delta_Sig

    D13 = Sig1_Base - Sig3_Base
    D23 = Sig2_Base - Sig3_Base

    if D13 > Tolerance_Delta_Sig
        degraded_status_sig1 = 0
    end

    if D23 > Tolerance_Delta_Sig
        degraded_status_sig2 = 0
    end
end
end

```

Afin de créer une variable représentative de l'état général du signal après les 2 tests, une synthèse est implémentée.

```

%% Signal 1
if range_status_sig1 || rate_status_sig1 || degraded_status_sig1 == 1
    Signal1_Status = 1;
else range_status_sig1 | rate_status_sig1 || degraded_status_sig1 == 0
    Signal1_Status = 0;
end

```

Enfin les signaux de sorties du bloc FTC sont construits :

1. La sortie « Theta\_FTC » est calculée sur la moyenne des signaux non dégradés
2. La sortie « Fail\_Case\_Message » contient tous les messages d'état des signaux (range\_status\_sig, rate\_status\_sig, degraded\_status\_sig) sous forme de booléen qui pourront être récupérés par une IHM ou autre système d'affichage de l'état du Bloc Observateur + FTC.



```

%% Tout les signaux sont bons

if Signal1_Status & Signal2_Status & Signal3_Status ==1

    Fail_Case_Message=0
    Theta_FTC = mean(Sig1_Base,Sig2_Base,Sig3_Base)
end

%% Deux signaux sont bons

if (Signal1_Status & Signal2_Status ==1) & (Signal3_Status ==0)

    Fail_Case_Message=Signal3_Status
    Theta_FTC = mean(Sig1_Base,Sig2_Base)
end

if (Signal1_Status & Signal3_Status ==1) & (Signal2_Status ==0)

    Fail_Case_Message=Signal2_Status
    Theta_FTC = mean(Sig1_Base,Sig3_Base)
end

if (Signal2_Status & Signal3_Status ==1) & (Signal1_Status ==0)

    Fail_Case_Message=Signal1_Status
    Theta_FTC = mean(Sig2_Base,Sig3_Base)
end

```

Pour tester le bloc commande FTC, un prototype de commande en simulant les observateurs par des « Signal Builder » est réalisé. Ses Steps seront choisis pour représenter les outputs d'observateurs en régime établi et des sinusoides pour tester les « Rate Limiter ».

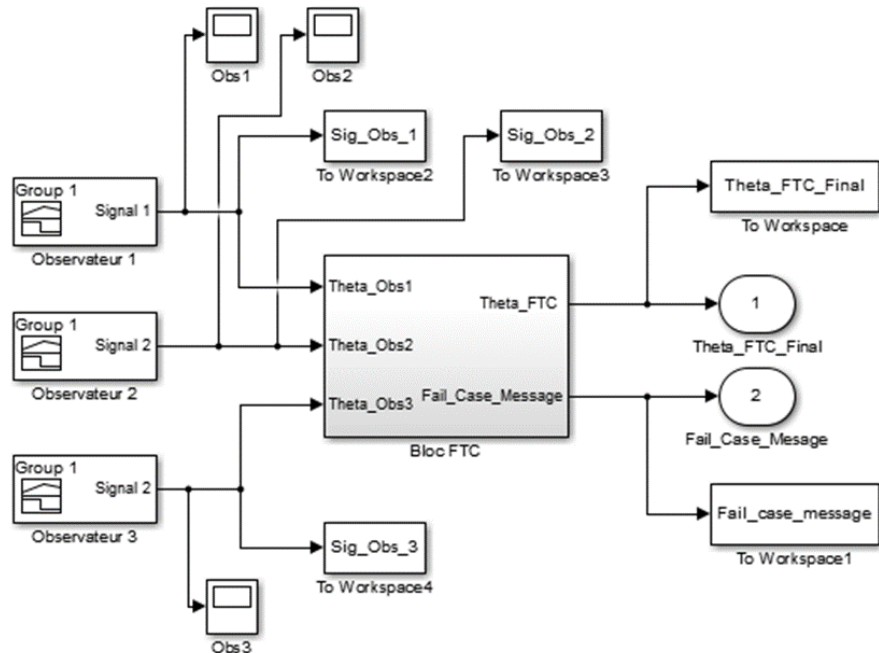


Figure 26 – Commande FTC Test

Les différents signaux d'entrée et de sortie sont observés pour la vérification. Dans le cadre des tests de notre commande FTC, on forcera les différents signaux d'entrées à des défauts pour vérifier la véracité des tests.

Comme introduit, le but de cette étude était de proposer un premier axe de réponse à la tolérance au défaut. Il reste donc encore du travail pour parfaire cette commande, cependant un maximum de ressources a été fourni dans l'idée d'une étude postérieure plus poussée.

Cette première étude est assez complète pour démontrer la faisabilité d'une tolérance au défaut sur une machine à réluctance variable.

## 5 Conclusion

L'objectif de cette étude était de commander une MRV sans capteur mécanique pour une application aéronautique. Le capteur mécanique servait à retransmettre la position et la vitesse de rotation de la partie mobile de la MRV. Sans cette position et cette vitesse, il est impossible d'asservir la machine, ce sont des informations indispensables. Afin de combler à ce défaut, il était nécessaire de créer un ou plusieurs observateurs permettant de relayer ces informations au système. Il s'agit d'une application logicielle et non plus matérielle. Suite à un état de l'art, il a alors été décidé de se focaliser sur deux sortes d'observateurs : le Sliding mode d'ordre deux et le filtre de Kalman. Ces deux techniques ont abouti à des résultats semblables et mènent à des corrections satisfaisantes. Cependant le filtre de Kalman peut être préféré de par sa précision et le dynamisme de sa réponse.

Néanmoins, un logiciel, tout comme un matériel, n'est pas infailible et peut être défectueux ou peut tomber en panne à tout moment. Or, le choix de s'affranchir de capteur mécanique impose la présence d'un contrôle logiciel. C'est pourquoi il a été nécessaire, dans cette étude, d'implémenter une commande FTC afin de palier la perte d'un observateur pouvant retransmettre les informations critiques. Le choix s'est porté vers une commande active dont le principe est de redonder chaque observateurs en créant un algorithme de vote décisionnaire de la valeur finale renvoyée au système asservi.

Les solutions proposées et étudiées lors de ce projet ne comportent aucune grande innovation. Cependant, elles permettent de valider qu'il est possible de s'affranchir du capteur mécanique ou d'avoir une solution technique fiable si le capteur mécanique tombe en panne lors d'un vol. De plus, même si les techniques de contrôle ne sont pas nouvelles, la machine à reluctance variable est un moteur dont les caractéristiques ne sont pas linéaires, il est donc difficile d'implémenter un contrôle stable et robuste. C'est pourquoi notre choix s'est basé sur des technologies bien connues, afin d'être certains de ce que pourrait apporter ces observateurs.

Par conséquent, il est conclu que la MRV est un moteur qui pourrait être intégré dans les avions de demain à condition que tous les autres cas de pannes aient pu être gérés.

## 6 Retour d'expérience et gestion de projet

Cette étude, réalisée sur 17 semaines, a été structurée par des outils de gestion de projet qui ont facilité sa mise en place ainsi que le respect des jalons. Le principal outil qui a été utilisé est le diagramme de Gantt (Figure 27).

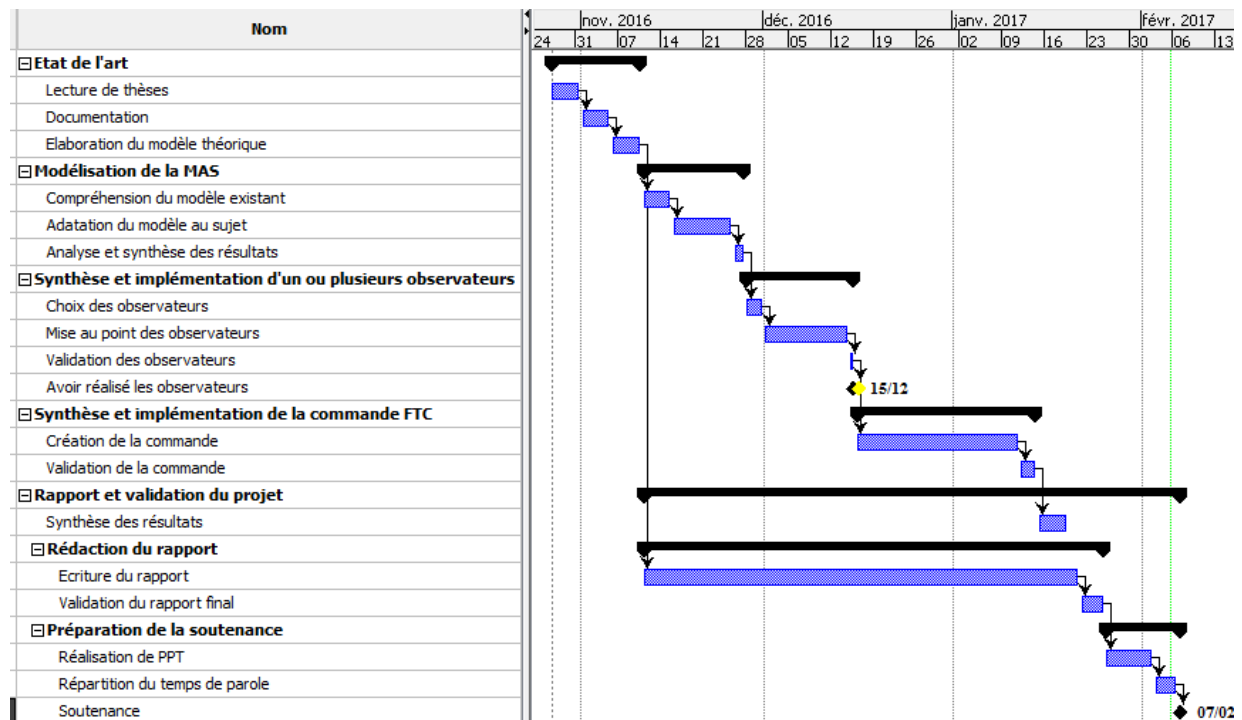


Figure 27 – diagramme de Gantt initial

Cet outil a permis de manager et gérer le projet ainsi que ses aléas. En effet, hormis les déplacements et absences potentielles de chacun des membres de l'équipe, un problème majeur a ralenti le projet. Lors de la mise en place du projet, le modèle de la MRV était fourni par les tuteurs de projet. Cependant, ce modèle était inutilisable sur les ordinateurs de l'ESTACA pendant plusieurs semaines. Il a fallu faire fonctionner ce modèle sur les ordinateurs personnels. Néanmoins, un seul ordinateur était capable de faire fonctionner la modélisation. Ceci a ralenti considérablement le projet et a impacté le diagramme de Gantt.

Une fois le problème résolu, la réorganisation du projet a pu être effectuée. Cependant, cela a pénalisé l'étude. Le travail n'a pas pu être aussi abouti que le groupe aurait souhaité.

Malgré ces aléas, les demandes premières du cahier des charges ont été remplies. De plus, cela a permis d'apprendre à évaluer les priorités dans un projet ainsi que de gérer le stress face au temps imparti et aux deadlines (réunions de projet tuteur, soutenance...).

## 7 Index des figures

Figure 1 – position du rotor par rapport au stator .....	5
Figure 2 – inductance selon la position du rotor selon une phase .....	5
Figure 3 – modélisation de la MRV .....	6
Figure 4 – modélisation de la MRV avec observateur .....	7
Figure 5 – schéma bloc de l'observateur par mode glissant de la vitesse et position de la MRV .....	10
Figure 6 – comparaison avec et sans capteur de la vitesse et position du rotor.....	11
Figure 7 – Paramètres relatifs au comportement de la MRV PI/MG sans capteur .....	11
Figure 8 – évolution des courants de chaque phase de la MRV PI/MG en régime permanent .....	12
Figure 9 – Position et vitesse pour différentes inerties, MRV PI/MG .....	13
Figure 10 – Intensité de chaque phase pour différentes inerties.....	13
Figure 11 – Position et vitesse pour différentes résistance internes, MRV PI/MG .....	14
Figure 12 – Paramètres relatifs au comportement de la MRV MG/MG sans capteur .....	15
Figure 13 – évolution des courants de chaque phase de la MRV MG/MG en régime permanent .....	15
Figure 14 – Position et vitesse pour différentes inerties, MRV MG/MG .....	16
Figure 15 – Intensité de chaque phase pour différentes inerties.....	17
Figure 16 – Position et vitesse pour différentes résistance internes, MRV MG/MG.....	17
Figure 17 – Modèle de Kalman, estimateur non biaisé .....	20
Figure 18 – Structure globale du filtre de Kalman étendu appliqué à la MRV .....	21
Figure 19 – Position et vitesse de rotation par utilisation d'EKF .....	22
Figure 20 – évolution du courant par l'utilisation d'un EKF .....	23
Figure 21 – Position et vitesse de rotation par utilisation d'EKF avec filtre de commande ....	23
Figure 22 – évolution du courant par l'utilisation d'un EKF avec filtre de commande .....	24
Figure 23 – Test de robustesse par rapport à l'inertie sur observateur de Kalman .....	25
Figure 24 – redondance des observateurs.....	27
Figure 25 – bloc FTC .....	29
Figure 26 – Commande FTC Test.....	32
Figure 27 – diagramme de Gantt initial .....	35

## 8 Index des Tableaux

Tableau 1 – Comparatif des moteurs électriques .....	4
--	---

## 9 Références

- [1] Nadir OUDDAH, Commande robuste de machine à réluctance variable pour la traction de véhicules électriques, thèse pour obtenir le grade de Docteur en spécialité automatique, délivré par l'université de Cergy Pontoise, 23 septembre 2005.
  
- [2] Wenzhe LU, Modeling and control of switched reluctance machines for electromechanical brake systems, PhD thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Ohio State University, 2005.
  
- [3] Aziz Raisemche, Commande tolérante aux défauts d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique, Université Paris Sud - Paris XI, 2014.