



**HAL**  
open science

# Modélisation et Commande d'un Système Innovant pour la Propulsion Navale

Mustapha Debbou

► **To cite this version:**

Mustapha Debbou. Modélisation et Commande d'un Système Innovant pour la Propulsion Navale. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083945

**HAL Id: hal-01083945**

**<https://hal.science/hal-01083945>**

Submitted on 18 Nov 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MODELISATION ET COMMANDE D'UN SYSTEME INNOVANT POUR LA PROPULSION NAVALE

**Mustapha DEBBOU, Maria PIETRZAK-DAVID**

Laboratoire Plasma et Conversion d'énergie, LAPLACE  
2, rue Charles Camichel BP 31177 Toulouse Cedex 7  
*mustapha.debbou@laplace.univ-tlse.fr, maria.david@laplace.univ-tlse.fr*

**RESUME** – l'article présente la modélisation et la commande d'un système innovant destiné pour la propulsion navale. La structure proposée est architecturée autour d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme moteur de propulsion et d'une hélice à trois pales fixes et symétriques. La modélisation du processus de propulsion créée par cette association est étudiée. Des stratégies de commande de type linéaires et non linéaires sont appliquées pour piloter le système et les résultats obtenus sont donnés. Une évaluation de ces stratégies sous deux critères, à savoir, les pertes dans les convertisseurs de puissance et les bruits acoustiques et vibratoires a été réalisée. La propulsion navale comme tout système embarqué, possède des exigences en matière de qualité de service non seulement en termes de performances mais aussi de fiabilité et de disponibilité, l'utilisation de la machine à double alimentation dans un système de propulsion offre une redondance structurelle naturelle et analytique que nous avons exploité soit pour la commande soit pour la reconfiguration pour garantir un fonctionnement dégradé en cas d'une défaillance d'un élément du système proposé.

**MOTS-CLES** – Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), Onduleur de tension, stratégies linéaires et non linéaires, défaillance, redondance, Digital Signal Processor (DSP), Field Programmable Gate array (FPGA).

**ABSTRACT** – This paper deals with the modeling of a Doubly Fed Induction Machine (DFIM) used in electrical naval propulsion. The advantages of the proposed architecture are described and exploited in order to guarantee improved power efficiency of this propulsion system. The load torque propeller model is developed and the Saber simulation results of all systems are presented and discussed. Two control strategies; the Stator Field Oriented Control (SFOC) and Sliding Mode Control (SMC) are proposed and compared under two criterions; losses in power converters and acoustics noise and vibrations. Naval propulsion as any embedded system has requirements for quality of service not only in performance but also reliability and availability, the use of the machine in electric naval propulsion system offers a natural structural and analytical redundancy which are exploited either to control or to the reconfiguration to guarantee service continuity in case of a component failure of the proposed system.

**MOTS-CLÉS** – Double Fed Induction Machine (DFIM), Voltage Source Inverter, Linear and non-linear control strategies, failure, redundancy, Digital Signal Processor (DSP), Field Programmable Gate array (FPGA).

## 1. Introduction

A travers l'histoire de la construction navale, souvent, le défi fût dans la manière de construire le navire autour d'un système de propulsion. C'est encore vrai avec les systèmes actuels où les grands acteurs de ce domaine veillent à l'amélioration des performances des architectures de propulsion. Dans les secteurs navals, civils ou militaires, un effort conséquent a été réalisé ces dernières années pour rendre les systèmes de propulsion moins lourds et moins encombrants. Ainsi, les navires intègrent de plus en plus de « solutions électriques ». Le navire tout électrique s'impose peu à peu comme une solution et une finalité pour la plupart des armateurs.

Ce domaine a su profiter des progrès dans les domaines de l'électronique de puissance (avec les composants et les structures de puissance), de l'électronique de commande des calculateurs (DSP et FPGA) ainsi que de nouvelles structures de moteur de propulsion (moteur à flux transverse, moteur supraconducteurs...). La combinaison de toutes ces avancées a permis de concevoir des architectures de propulsion fiables, robustes, plus performantes et moins coûteuses.

Pour améliorer les systèmes d'entraînement des navires, les chercheurs et les industriels ont adopté deux démarches. L'une d'entre elle repose sur l'amélioration des structures des moteurs d'entraînements déjà existantes [1]. L'autre démarche quant à elle, consiste à introduire de nouvelles topologies de machine et système de contrôle pour répondre aux contraintes imposées par la propulsion navale.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cette seconde démarche et constitue un fruit de collaboration dans le cadre du projet MADA-SIC. La Direction Générale d'Armement (DGA) a souhaité expérimenter une solution novatrice avec l'emploi de la **machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme machine de propulsion**, associée à des convertisseurs d'alimentation à base de carbure de silicium (SiC).

L'étude porte donc sur deux axes :

- Le premier axe est conceptuel et concerne la caractérisation comportementale des composants SiC, qui ne sont pas industrialisés à l'heure actuelle. Plusieurs programmes de recherche lancés par la DGA [2] sur la réalisation et l'optimisation des étapes technologiques pour la fabrication de composants de puissance en carbure de silicium,
- L'innovation apportée dans le cadre de cette étude, est de mettre en œuvre une MADA à des fins de propulsion avec une répartition de puissance entre stator et rotor unitaire. Cette initiative répond à une exigence posée par la commande suite aux études menées au sein laboratoire LAPLACE [3] et qui a suscité l'intérêt de la DGA vers ce type de machine.

Si l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation est très abondante dans la littérature et surtout dans le domaine de la conversion d'énergie, un intérêt particulier a été attribué au fonctionnement au moteur pour les raisons suivantes [4] :

- Plus de degré de liberté,
- Une plus grande souplesse de fonctionnement,
- Possibilité de répartition de puissance active,
- Possibilité de fonctionnement en mode dégradé.

La machine asynchrone à double alimentation de par sa structure et les lois de commande qui lui sont appliquées a les possibilités de répondre aux contraintes sévères imposées par le cahier de charge naval.

## 2. Modélisation du système

Le système proposé et étudié est présenté dans la figure 1, il est principalement constitué de :

- Une Machine Asynchrone à double alimentation,
- Un autotransformateur entre le réseau et le redresseur du côté rotorique afin de bien respecter le niveau de tension,
- Deux redresseurs et deux onduleurs de tension à bus séparés en présentant les grandes étapes et les principaux résultats,
- Un réseau alternatif,
- Une hélice à trois pales fixes et symétriques.

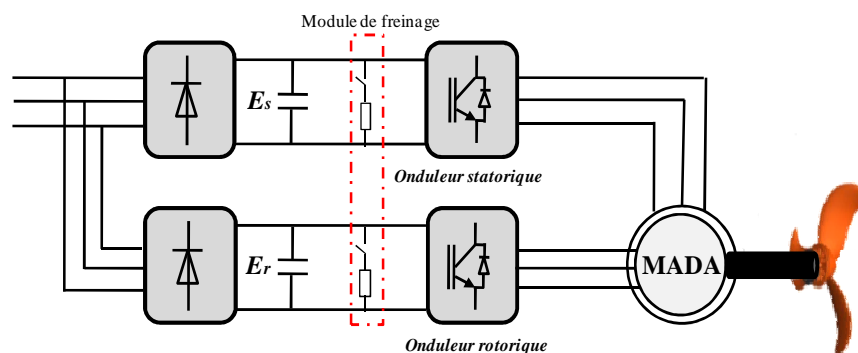


Figure 1 : Schéma du système étudié.

La modélisation du propulseur passe par la modélisation de chaque partie le constituant.

## 2.1 Modélisation de la machine de propulsion

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation est reportée dans [3], nous préférons focaliser l'étude sur la modélisation hydrodynamique et des phénomènes se passant autour de l'hélice.

## 2.2 Modélisation hydrodynamique de base

Il constitue le modèle de base des propulseurs, il représente une modélisation partielle de l'hélice qui est généralement intégrée dans des modèles plus complexes et prenant en compte des phénomènes se déroulant autour de l'hélice, d'où le nom de base.

### 2.2.1 Modèle du régime permanent

Ce modèle découle de la relation hydrodynamique de base, introduites par **Whitcomb et Yoerger** [5], la poussée  $T$  et couple résistant  $Q$  peuvent s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} T &= \lambda_T \Omega |\Omega| \\ Q &= \lambda_Q \Omega |\Omega| \end{aligned} \quad (1)$$

Le principe de ce modèle est représenté dans la figure 3.

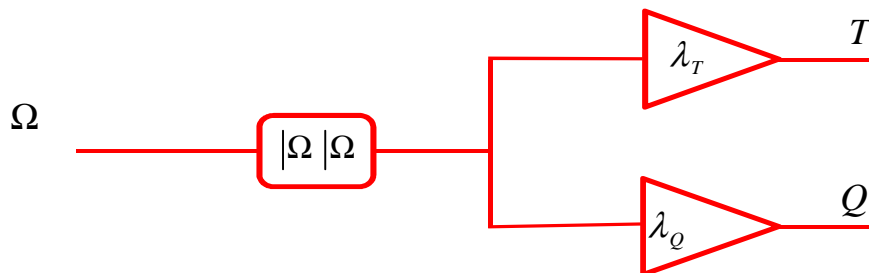


Figure 2 : Schéma de principe du modèle du régime permanent.

L'obtention des coefficients de poussée  $\lambda_T$  et de couple  $\lambda_Q$  passe par une série d'essai en eau statique (pas de courant marin) pour plusieurs valeurs de  $\Omega$ . L'hélice doit être émergée et doit être en charge. La mesure de  $T$  se fait à l'aide d'un capteur de force tandis que  $Q$  se mesure avec un couple mètre.

Le principal inconvénient de ce modèle est qu'il ne modélise absolument pas les régimes transitoires, et qu'il ne prend en considération la vitesse ambiante relative à l'eau.

### 2.2.2 Modèle de l'aile portante

Le principe du modèle de l'aile portance pour une hélice marine est de la ramener à une hélice aérodynamique émergée dans l'eau, lorsqu'elle tourne elle est caractérisée par une force de portance et une force de trainée (voir la figure 3).

$$\begin{aligned} T &= L \cos(\theta) - D \sin(\theta) \\ Q &= 0.7rL \sin(\theta) + D \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

Où  $L$  et  $D$  sont les caractéristiques de la portance et de trainée, ce sont des coefficients dépendant principalement de l'angle d'attaque  $\alpha$ .

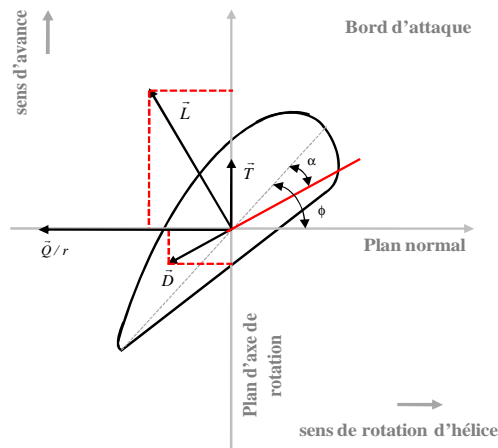


Figure 3 : Schéma de principe du modèle de l'aile portante.

### 3. Les stratégies de commande et leurs évaluations

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et le couple de charge hydrodynamique a été évoquée précédemment. Il est à rappeler que la nature même du couple de charge conditionne largement le choix de la loi de commande à appliquer, alors, des commandes linéaires et non linéaires ont été développées et validées dans l'environnement *SABER* sur un cycle de fonctionnement typique de la propulsion navale, les résultats sont donnés ci-dessous.

#### 3.1 Commande linéaire

La loi linéaire appliquée est une commande vectorielle à orientation du flux dont certaines polémiques donnent pérennité à Blondel. Les premiers développements théoriques de la méthode d'orientation du flux reviennent à Blaschke au début des années 70, mais ses applications n'ont vu le jour que par les travaux de Léonard dix ans plus tard [6].

La commande vectorielle se base sur le choix d'un repère de référence. Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour l'orientation de l'axe  $d$  suivant le flux statorique, par conséquent, on obtient :

$$\phi_s = \phi_{sd} = \phi_{sn} \quad (3)$$

Le principe de la commande vectorielle associée au modèle du régime permanent de l'hélice est illustré dans la figure 4.

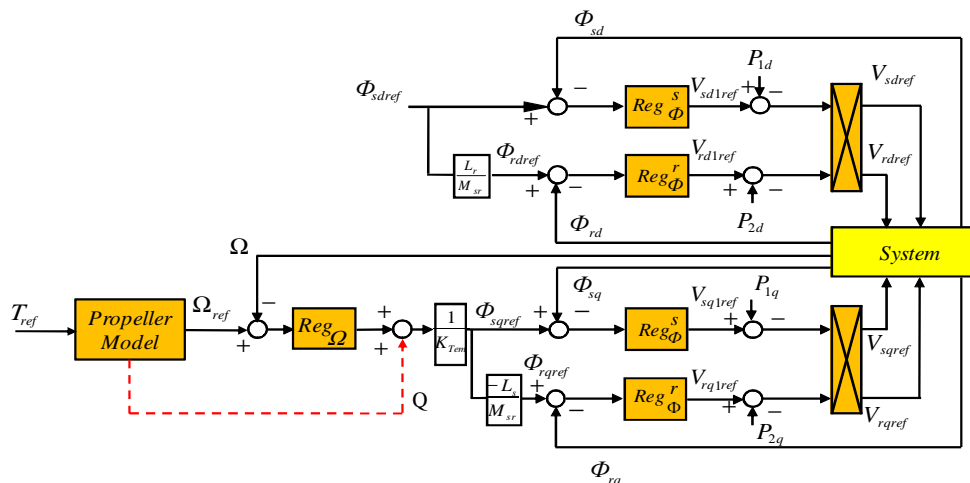


Figure 4 : Principe de la commande vectorielle sur un propulseur.

L'analyse des résultats illustrés dans la figure 5 montre que la vitesse mesurée suit bien la consigne calculée à partir du modèle du propulseur étudié, il vient ensuite de noter la bonne régulation des flux sur les deux axes ( $d$ ,  $q$ ) de la machine comme la montre les figures 5.c et 5.d.

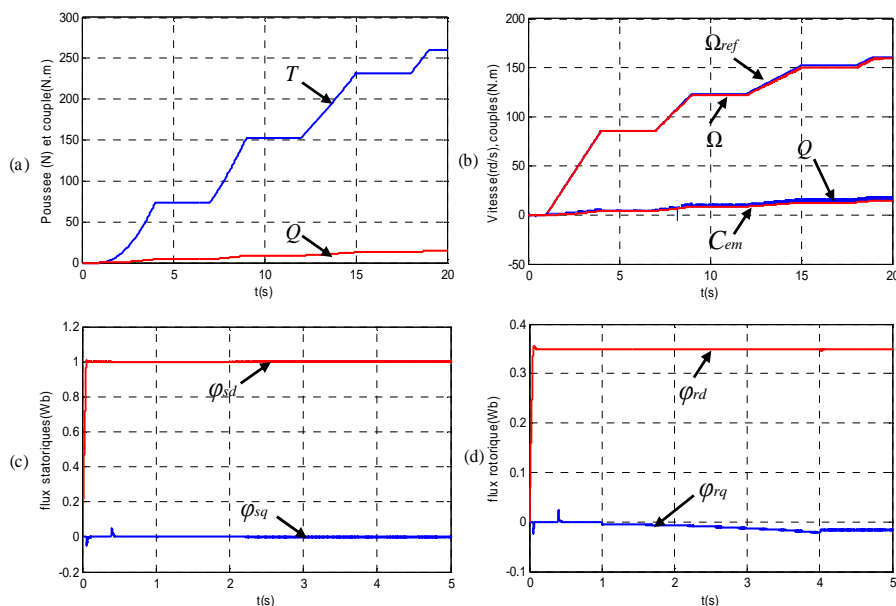


Figure 5 : Résultats de simulation de la propulsion avant avec la commande vectorielle.

## 3.2 Commande non linéaire

Deux stratégies de type à structures variables ont été développées et appliquées sur la commande de la machine asynchrone à double alimentation. Il s'agit principalement de la commande par mode de glissement, puis la commande dite directe du couple.

Dans ce papier, seule la commande par mode de glissement a été retenue pour être présentée parmi les commandes non linéaires.

### 3.2.1 Commande par mode de glissement

Les premiers travaux sur la commande par mode de glissement ont vu le jour en 1964 par Fillipov, puis appliquée au contrôle des systèmes par Utkin en 1977 (URSS) [7], avant d'être mise en œuvre sur des systèmes rapides au milieu des années 90.

Le principe fondamental de cette stratégie consiste à modifier la structure d'asservissement de manière à glisser sur une surface de glissement bien définie d'où le nom de **mode de glissement**. L'intérêt porté à cette commande est dû au fait qu'elle soit robuste à la variation des paramètres de la machine (comparé à la commande linéaire) et qu'elle a une fréquence de découpage fixe puisqu'elle fait intervenir des modulateurs de type MLI.

Le principe de la régulation pour le mode mécanique est donné dans la figure 6. Il est très similaire à ceux de la commande vectorielle, sauf que Ce sont des régulateurs de type glissants.

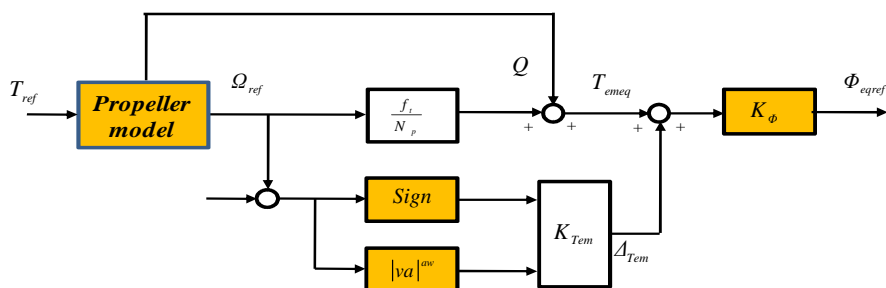


Figure 6 : Exemple d'application de la commande par mode de glissement pour le mode mécanique.

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés dans la figure 6. L'analyse de ces derniers atteste de la bonne régulation de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine et des flux statoriques et rotoriques.

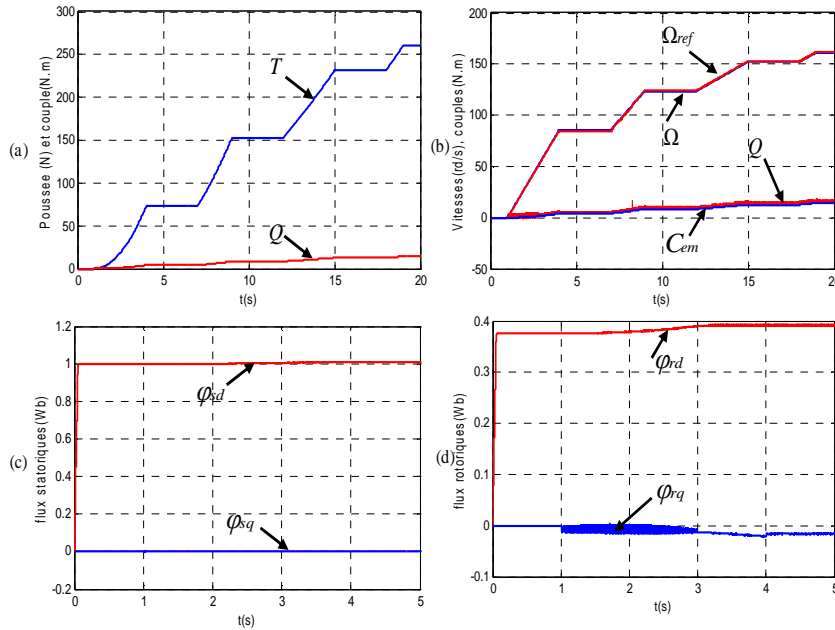


Figure 7 : Résultats de simulation sous SABER de la commande par mode de glissement.

### 3.3 Evaluation des stratégies des commandes

L'objectif visé dans cette section est d'évaluer l'influence des méthodes de commande appliquées et les modulateurs introduits (figure 8) sur les pertes d'onduleur et les bruits acoustiques et vibratoires engendrés.

#### 3.3.1 Estimation des pertes dans le convertisseur d'alimentation

Une première étude analytique a été menée pour calculer les pertes dans les composants de puissance. On évalue ces pertes pour des phases choisies du cycle de fonctionnement pour chaque stratégie de commande appliquée.

Les pertes dans l'onduleur ont deux origines : les pertes par conduction et les pertes par commutation :

$$P_{tot} = P_{con} + P_{comm} \quad (4)$$

Où :  $P_{tot}$  : pertes totales dans l'onduleur,  $P_{con}$  : Pertes en conduction,  $P_{comm}$  : Pertes en commutation

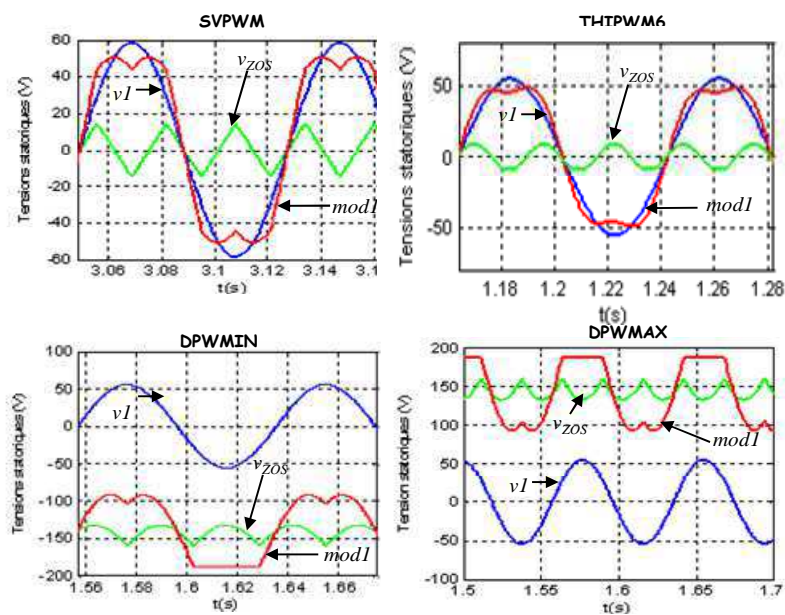


Figure 8 : Exemple de modulateurs associés aux stratégies de contrôle.

**Tableau 1. Comparaison des pertes pour une phase de croisière des stratégies de commande appliquées.**

	Commande vectorielle(%)	Commande par mode de glissement(%)
SPWM	12.26	5.40
SVPWM	12.25	5.41
THIPWM4	12.23	5.41
THIPWM6	12.25	5.41
DPWMIN	1.22	0.7
DPWMAX	14.28	5.29
DPWM0	11.42	5.19
DPWM1	11.34	5.20
DPWM2	11.41	5.06
DPWM3	11.20	5.20

Comparer est toujours une tâche délicate, avec les conditions de simulation égales, il ressort de cette études que :

- Les modulations de type DPWM apportent un grand intérêt pour la réduction des pertes dans les convertisseurs,
- La modulation de type DPWMIN associée à la commande par mode de glissement offre la commande optimale en termes de perte énergétique dans les zones choisies.

### 3.3.2 Etude des bruits acoustiques et vibratoires

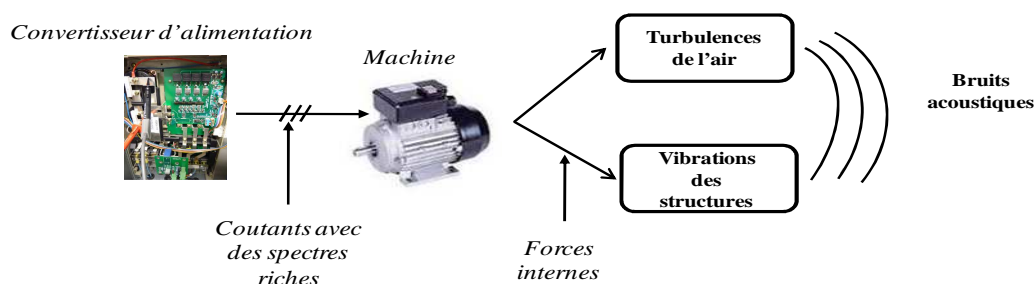
La propulsion électrique représente un atout majeur pour les navires en termes de réduction du bruit acoustique et vibratoire, que ce soit pour le civil, où le confort du voyageur est directement lié à cet aspect, ou pour les militaires dont la discrétion acoustique constitue un critère vitale et prioritaire.

Le bruit d'un système de propulsion navale est bien d'une part le bruit que rayonnent les hélices dont la rotation crée de la cavitation du fait des dépressions induites sur les faces des pales, auquel les militaires attachent beaucoup d'importance (problème de détection et de discrétion), et d'autre part le bruit à bord produit par les installations (système de propulsion et machine et machines auxiliaires). Pour la deuxième partie, un domaine de propulsion où nous nous situons, et pour la partie qui nous concerne, les bruits acoustiques sont pris en compte lors la phase de conception du moteur de propulsion ainsi que la commande qui lui est associé.

L'étude qui va suivre concerne un problème de bruit acoustique qui peut vite devenir inacceptable et qui apparaît lors d'une association « Onduleur-machine ».

Le bruit électromagnétique est d'origine magnétique peut être défini comme le bruit audible généré par les forces magnétiques présentes dans la machine, ces dernières étant elles-mêmes produites par des courants : il a donc la propriété de cesser lorsqu'elle alimentation est nulle [8].

De façon simple, le bruit acoustique dans une machine est dû aux vibrations mécaniques de la structure du moteur (principalement le stator, la plaque de base, la carcasse), mais aussi aux vibrations acoustiques (turbulences de l'air) produites par le mouvement du rotor.



**Figure 9 : Principe de la génération des bruits acoustiques et vibratoires.**



Une analyse des différentes stratégies (linéaires et non linéaires) associées aux différents modulateurs (SPWM, SVPWM, THIPWM, DPWM) décrites dans ce papier a montré que les spectres de courant sont chargés en harmonique d'où un bruit acoustique monochromatique assez désagréable. La MLI aléatoire a été introduite dans l'objectif de réduire les bruits acoustiques et vibratoires, avec une originalité qui consiste à faire varier la fréquence de commutation d'une manière sinusoïdale, afin d'étaler le spectre et de réduire les raies d'amplitudes élevées comme le montre la figure 10.

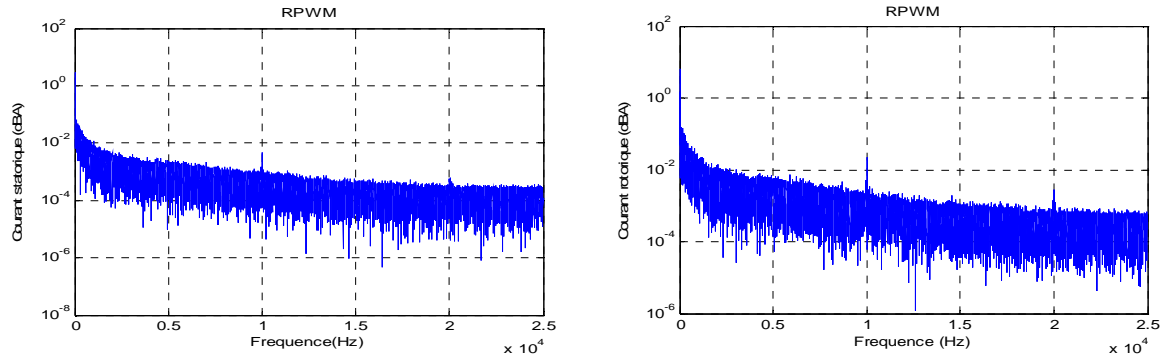


Figure 10 : Spectres des courants pour la MLI aléatoire.

#### 4. Un système innovant à tolérance de pannes

La conception d'un système de propulsion naval axé principalement autour de la Machine Asynchrone à Double Alimentation constitue une solution novatrice vue les degrés de liberté qu'offre de ce type de structure. En effet, ce système comme tous systèmes conçus pour ces types d'applications doit assurer et garantir une continuité de service à l'apparition de défauts au sein des constituants du système. Ainsi, deux types de défaillances ont été considérés dans nos travaux, le premier concerne un défaut au niveau des semi-conducteurs de puissances et le second concerne le défaut du capteur de vitesse/position.

##### 4.1 Défaut semi-conducteur de puissance

Le développement constant de nouvelles applications embarquées dans le domaine des transports placent l'électronique de puissance dans des conditions de fonctionnement toujours plus sévère. Malgré une nette évolution de leurs performances électrique et thermiques ces dernières années, les composants et modules de puissances restent et resteront indéniablement parmi les éléments les plus fragiles du système de conversion. De ce fait, des études de fiabilités sur les composants de puissance ont été conduites.

Un défaut de court-circuit des semi-conducteurs de puissance est une des situations les plus contraignantes dans un circuit puisqu'il peut entraîner une défaillance des dispositifs si des dispositions appropriées pour la protection de ces derniers ne sont pas adoptées. Lors de ce type de défaut, un courant très important parcourt le composant alors qu'il existe la pleine tension à ses bornes. Un défaut de court-circuit d'un interrupteur introduit un couple pulsatoire qui peut être très dangereux sur la machine [9], d'où la nécessité de proposer une solution en cas de cette défaillance mais tenant en compte de l'aspect embarqué de l'application.

Une solution est introduite dans un contexte de défaut court-circuit, la méthode repose sur l'utilisation de l'interrupteur défaillant et les degrés de liberté offerts par la MADA par sa double alimentation pour assurer une reconfiguration de la machine asynchrone à double alimentation en une machine asynchrone classique dans l'objectif d'assurer une continuité de service.

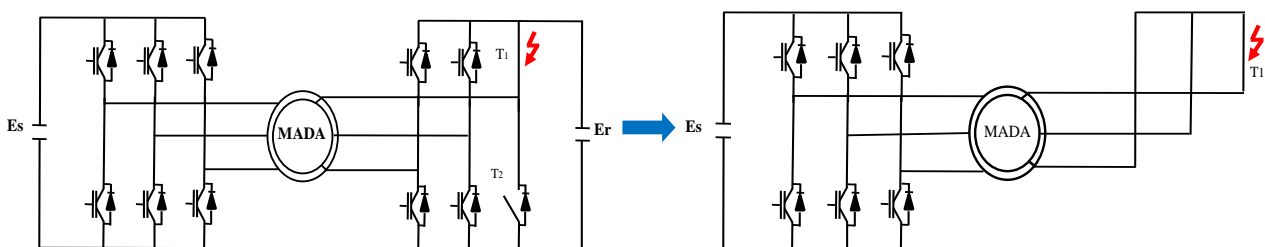


Figure 11 : Reconfiguration de la MADA à la MAS à cage.

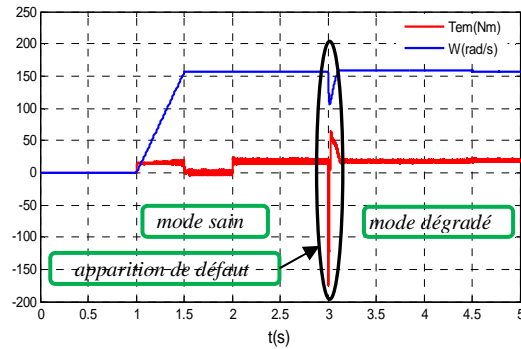


Figure 12 : Continuité de service sous un défaut court-circuit.

La figure 12 montre qu’avec l’apparition du défaut à l’instant  $t=3s$ , on remarque un transitoire qui s’établit, mais après reconfiguration de la structure et la commande adéquate, la continuité de service est observée.

## 4.2 Défaillance du capteur de vitesse/position

La méthode utilisée propose d’exprimer les quatre composantes du vecteur courant rotorique, ce qui permet de définir une relation entre eux permettant de générer la position du rotor de la machine.

Les courant rotorique exprimés en fonction des courants mesurés, et ceux dans le repère lié au stator  $\alpha\beta_s$  :

$$\begin{aligned}
 i_{ra_r} &= \sqrt{3/2} \cdot i_{r_1} & i_{ra_s} &= \frac{\hat{\Phi}_{s\alpha_s} - L_s \cdot i_{s\alpha_s}}{M_{sr}} \\
 i_{r\beta_r} &= \sqrt{2}/2 \cdot i_{r_1} + \sqrt{2} \cdot i_{r_2} & i_{r\beta_s} &= \frac{\hat{\Phi}_{s\beta_s} - L_s \cdot i_{s\beta_s}}{M_{sr}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

L’expression de la position est ainsi déduite comme montrée dans (6) :

$$\theta_o = \tan^{-1} \frac{i_{r\beta_s} \cdot i_{ra_r} - i_{r\beta_r} \cdot i_{ra_s}}{i_{ra_s} \cdot i_{ra_r} + i_{r\beta_r} \cdot i_{r\beta_s}} \tag{6}$$

Une fois la position estimée, on obtient la vitesse en utilisant l’algorithme Angle Tracking Observer (ATO).

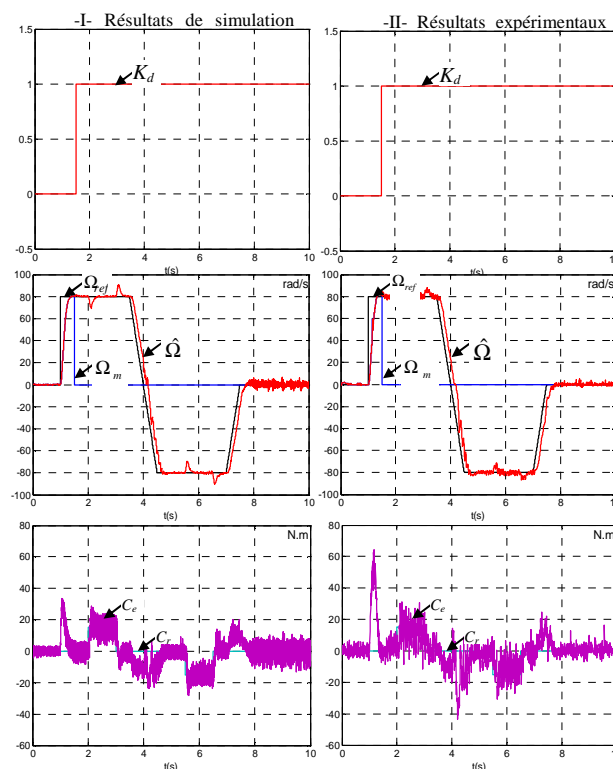


Figure 13 : Continuité de service sous un défaut de capteur /vitesse.

La figure 13 montre les résultats de l'utilisation de l'estimateur de vitesse/position introduit dans nos travaux de recherche. L'analyse de ces courbes montre que même avec la défaillance du capteur mécanique (à l'instant  $t=1.5s$ ) l'estimateur analytique assure la continuité de service en introduisant l'information position /vitesse nécessaire à la régulation, le système garde ses performances d'avant le défaut.

## 5. Validation expérimentale

Le banc expérimental qui sert à valider expérimentalement le comportement du système étudié est illustré dans la figure 13. Il est principalement constitué d'une MADA de puissance 4kW, une machine à courant continu (MCC) comme émulateur de couple de charge, des cartes de contrôle où le choix s'est porté sur une association d'un DSP de *TEXAS INSTRUMENT* (TMS320C6711) et d'un FPGA de chez *ALTERA* (EP1K 100 QC 208-2) et un autotransformateur.

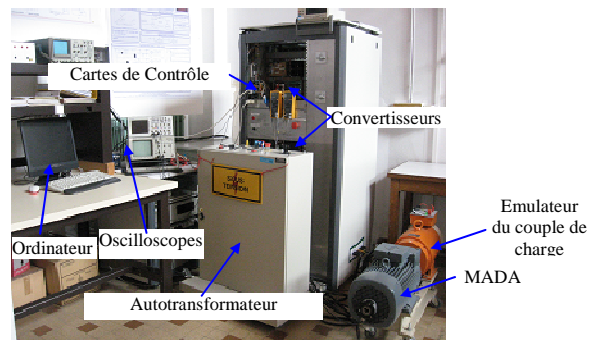


Figure 14 : Photo du banc expérimental.

## 6. Conclusion

L'introduction de la MADA dans les systèmes de propulsion offre une alternative intéressante et constitue une solution innovante pour ce type d'architecture.

Une modélisation fine de la machine et de sa charge a été élaborée, des commandes linéaires et non linéaires sont appliquées et les résultats obtenus en simulation avec SABER et en expérimentation en utilisant le banc expérimental montrent le fonctionnement correct du système. Une comparaison a été effectuée sous deux contraintes : pertes dans les convertisseurs et les bruits acoustiques et vibratoires.

La fiabilité représente un aspect inhérent à certaines applications telles que l'aéronautique et le spatial. La marine ne dérogeant pas à la règle, nous avons veillé à la prise en compte de cet aspect dans le système proposé.

## Références

- [1] R. LATEB, "Modélisation des machines asynchrone et synchrone à aimants avec prise en compte des harmoniques des espaces et de temps", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, (2006).
- [2] P. BROSSELDARD, "Conception, Réalisation et Caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5kV) en carbure de silicium", Thèse de l'Institut National des sciences appliquées de Lyon, (2006).
- [3] F. BONNET, "Contribution à l'Optimisation de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en mode Moteur", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, (2008).
- [4] M. Abdellatif, M. Debbou, I. Slama-Belkhdja et M. Pietrzak-David, "Simple Low-Speed Sensorless Dual DTC for Double Fed Induction Machine Drive", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 61, pp. 3915-3922, (2014).
- [5] L. W. e. D. Yoeger, "Development, comparaison, and preliminary experimental validation of non-linear dynamic truster models", *IEEE Journal of Oceanic engineering*, pp. 481-494, (1999).
- [6] G. GRELLET et G. CLERC, "Actionneurs Electriques, Principe –Modèles –Commande", Paris: collection Electrotechnique, éditions Eyrolles, (1997)
- [7] I.V. Utkin, "Variable structure systems with sliding mode", *IEEE Trans on auto Contro.* 212-222, (1997).
- [8] J. L. BESNERAIS, V. LANFRANCHI, M. HECQUET et P. BROCHET, «"Bruit audible d'origine magnétique dans les machines asynchrones", *Technique de l'ingenieur*,D3580, (2008).
- [9] M. Debbou, M. Pietrzak-David, Novel tolerant fault DFIM drive for naval propulsion", *39th Annual Conference of the IEEE, IECON*, pp. 3006-3011, (2013).