



## AVIS DE SOUTENANCE DE THESE

Le Doyen de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz –Fès – annonce que

Mme **ECHIHEB Farah**  
Soutiendra : le Samedi 14/06/2025 à 10H00  
Lieu : **FSDM – Centre Visioconférence**

Une thèse intitulée :

«Contribution à l'implémentation en temps réel des stratégies de commande non linéaires et hybrides optimisées par l'ACO pour les systèmes éoliens à base de la GADA »

En vue d'obtenir le **Doctorat**

FD : **Sciences et Techniques**

Spécialité : **Génie Electrique**

Devant le jury composé comme suit :

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
EL BEKKALI Chakib	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Président
OUCHBEL Taoufik	Ecole Supérieure de Technologie, UMP, Oujda	MCH	Rapporteur & Examineur
BENABOUD Aziza	Ecole Royale Navale, Casablanca	PES	Rapporteur & Examineur
EL GHZAOUI Mohammed	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Rapporteur & Examineur
BOUSSETTA Mohammed	Ecole Supérieure de Technologie, USMBA, Fès	MCH	Examineur
ZAHBOUNE Hassan	Ecole Supérieure de Technologie, UMP, Oujda	MCH	Examineur
BOSSOUFI Badre	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse



## Résumé de la thèse

Les machines asynchrones à double alimentation (MADAs) sont largement utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable en raison de leurs avantages en termes de contrôle des puissances active et réactive. Cependant, leur commande pose plusieurs défis, notamment la réduction des effets indésirables du chattering dans les techniques non linéaires et l'impact des harmoniques sur la qualité des signaux électriques.

Dans cette thèse, nous avons tout d'abord réalisé une modélisation complète de la chaîne de conversion éolienne, mettant en évidence les différentes composantes du système et leur interaction. Une analyse approfondie des stratégies de commande a été menée, avec un accent particulier sur la méthode du Maximum Power Point Tracking (MPPT) permettant d'optimiser l'extraction de la puissance éolienne. Ensuite, une étude détaillée de la MADA a été effectuée afin de garantir un contrôle précis et indépendant des puissances active et réactive.

Dans un premier temps, nous avons étudié les approches de commande linéaire basées sur des régulateurs PI, avant d'explorer des techniques de commande non linéaire, notamment la commande par mode glissant (MG). Une loi de commande a été développée pour assurer la régulation des puissances active et réactive, et ses performances ont été évaluées en termes de suivi et de robustesse. Cette commande a été implémentée et validée en temps réel sur la carte DSPACE DS1104, avec une visualisation des résultats sur ControlDesk. Toutefois, malgré son efficacité, elle présente l'inconvénient majeur du chattering, pouvant dégrader les performances du système et générer des harmoniques indésirables.

Pour pallier ce problème, nous avons proposé une commande hybride innovante, combinant le mode glissant et le backstepping (MG-BS). Cette approche a été optimisée à l'aide de l'optimisation par colonies de fourmis (ACO), permettant d'ajuster de manière optimale les gains de la commande pour minimiser le chattering et améliorer la stabilité du système. Une analyse spectrale des harmoniques (THD) a été réalisée afin de comparer les performances de la commande par mode glissant, de la commande hybride MG-BS et de la commande MG-BS optimisée par ACO. Les résultats ont mis en évidence une réduction significative du THD avec l'approche optimisée, démontrant ainsi son efficacité en termes de qualité des signaux et d'amélioration de la performance globale du système.

Bien que la commande par mode glissant MG et la commande hybride MG-BS aient montré de bonnes performances, c'est la commande hybride optimisée ACO MG-BS qui a le plus contribué à l'amélioration de la robustesse du système et à la qualité des signaux, en réduisant considérablement les harmoniques et le THD. Cette approche a ainsi permis une gestion plus précise et plus stable des MADAs, offrant une solution particulièrement efficace pour les systèmes éoliens modernes.

Enfin, les contributions de cette recherche résident dans l'amélioration de la robustesse et de la précision de la commande des MADAs, tout en proposant une solution optimisée et applicable en temps réel aux systèmes éoliens. Ces avancées permettent d'envisager une intégration efficace de la commande MG-BS optimisée par ACO dans les systèmes éoliens modernes, avec un potentiel d'amélioration des performances globales des générateurs éoliens.

**Mots clés :** Énergie éolienne, convertisseur côté rotor, convertisseur côté réseau, suivi du point de puissance maximale MPPT, commande par orientation de flux FOC, commande par mode glissant MG, MATLAB/Simulink, , dSPACE DS1104.



## Abstract

Doubly fed induction machines (DFIMs) are widely used in variable-speed wind energy systems due to their advantages in controlling both active and reactive power. However, controlling these generators poses several challenges, particularly in reducing the chattering effect in nonlinear control techniques and mitigating harmonic distortions affecting signal quality.

In this thesis, we first conducted a comprehensive modeling of the wind energy conversion system, focusing on analyzing its various components and their interactions within the system. A detailed study of control strategies was carried out, with particular emphasis on the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique, which ensures optimal power extraction from the wind. Subsequently, a thorough analysis of the DFIM system was performed to achieve precise and independent control of both active and reactive power.

Initially, we examined linear control approaches based on Proportional-Integral (PI) regulators before exploring nonlinear control techniques, particularly Sliding Mode Control (SMC). A control law was synthesized to regulate active and reactive power, and its performance was assessed in terms of tracking accuracy and robustness. This control strategy was implemented and tested in real-time using the DSPACE DS1104 board, with results visualized via ControlDesk. However, this approach suffers from the chattering phenomenon, which can negatively impact system performance and introduce undesirable harmonics.

To overcome this issue, we developed an innovative hybrid control approach combining Sliding Mode Control and Backstepping (SM-BS). To further enhance its performance and minimize chattering effects, the control gains were optimized using the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm. Furthermore, we conducted a spectral harmonic analysis (THD) to compare the performance of classical SMC, hybrid SM-BS, and the optimized ACO based SM-BS control strategies. The results demonstrated a significant reduction in THD when using the optimized approach, confirming its effectiveness in improving signal quality and overall system performance.

Although the sliding mode control SMC and the hybrid SM-BS control have shown good performance, it is the hybrid optimized control ACO SM-BS that has contributed the most to improving the system's robustness and signal quality, by significantly reducing harmonics and THD. This approach has thus enabled more precise and stable management of DFIMs, providing a particularly effective solution for modern wind energy systems.

Finally, the contributions of this research lie in enhancing the robustness and precision of DFIM control while providing an optimized and real-time applicable solution for wind energy systems. These advancements enable the efficient integration of the ACO-optimized SM-BS control strategy into modern wind energy systems, with the potential to improve the overall performance of wind generators.

**Keywords :** Wind energy, rotor-side converter, grid-side converter, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Field-Oriented Control (FOC), Sliding Mode Control (SMC), Hybrid Sliding Mode-Backstepping Control (MG-BS), MATLAB/Simulink, dSPACE DS1104.