

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AHMED DRARIA D'ADRAR



Faculté de Sciences et de la Technologie

Département Génie Electrique

Thèse de Doctorat LMD

Présentée par :

Fatiha BEKRAOUI

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT LMD** :

Filière : Electrotechnique

Option : Machine électrique

**Etude et dimensionnement d'une éolien à vitesse variable basée sur une machine
synchrone à aimant permanent MSAP**

Devant le jury composé de :

Mr. HAMMOUDA Messaoud	Professeur	Université d'Adrar	Président
Mr. YAICHI Ibrahim	MCA	Université d'Adrar	Examineur
Mr. GHAITAOUI Touhami	MCA	Université d'Adrar	Examineur
Mr. DAHBI Abdeljalil	DDR	URER-MS Adrar	Co-directeur
Mr. HARROUZ Abdelkader	Professeur	Université d'Adrar	Directeur de thèse

Année Universitaire 2022 /2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*à ma Mère,
à la mémoire de mon père,
à ma sœur et mes frères,
à la mémoire de mes grands-parents,
à tous mes amis,
à toute ma famille.*

REMERCIEMENT

Ce travail est le fruit de plusieurs années de travail. Ce travail n'aurait pas abouti sans la contribution et l'encouragement de plusieurs personnes.

Je tiens, tout d'abord à remercier :

M. A. HARROUZ, Professeur à l'université d'adrar d'avoir accepté la direction de cette thèse. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son soutien et pour avoir partagé ses connaissances.

*Je tiens à exprimer ma gratitude à mon co-directeur **Mr. A. DAHBI**, directeur de recherche à l'unité de recherche en énergie renouvelables au milieu saharien.*

Je remercie tous les membres de jury pour le temps qu'ils ont accepté d'accorder à l'évaluation de ce travail de thèse, je cite :

Mr. M. HAMMOUDA, professeur à l'université d'adrar, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance ;

*Mes profonds respects à **Mr. T. GHITAOUI** maitre de conférences 'A' à l'Université d'Adrar pour sa participation au jury de soutenance en qualité d'examineurs.*

*Mes sincères remerciements vont à **Mr. I. YAICHI** maitre de conférence 'A' à l'Universités d'adrar pour sa participation au jury de soutenance en qualité d'examineurs,*

A. BEKRAOUI, K. ROUMMANI, maitre de recherche 'B' a l'unité de recherche en énergie renouvelables au milieu saharien URERMS Adrar, pour tous les efforts, le soutien, l'espoir qui m'ont donné pendant toutes ces années.

Merci à toutes les personnes dont je ne citerai les noms. A celles qui ont su redonner espoirs sans même qu'elles le sachent.

Merci à ma mère, ma sœur, mes amis, ainsi qu'à toute ma famille.

La consommation mondiale en énergie électrique devient plus en plus très importantes dans ces années. Mais la consommation de cette matière essentielle à la vie moderne pose des contraintes environnementales. Pour réduire cette consommation le plus tôt possible, la politique mondiale se penche vers les énergies renouvelables tel que l'énergie éolienne. Néanmoins, le critère aléatoire de cette dernière nous oblige à maîtriser ce système et imposer des lois de commande afin de bien profiter de sa puissance et de satisfaire les besoins des charges. L'objectif exposé dans ce travail consiste à la recherche d'améliorer la qualité de l'énergie électrique extraite des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et le dimensionnement de ce système d'éolien à vitesse variable, afin de produire une attaque directe à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent en appliquant une stratégie de commande. Les résultats obtenus fondent l'évidence de l'efficacité de cette stratégie de contrôle proposée en termes de robustesse pour différentes vitesses du vent. L'étude démontre l'objectif de contrôle pour arrive à extraire l'énergie maximale de système, l'objectif formulé comme un problème d'optimisation afin de trouver les paramètres du contrôleur. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation de deux techniques était nécessaire ; les algorithmes PSO (Particle Swarm Optimization) et GWO (Grey wolf Optimization) pour obtenir les paramètres de gains du contrôleur. Les tests des résultats de simulation sont vérifiés sous l'outil MATLAB/Simulink ces tests ont démontré l'efficacité et la fiabilité de la stratégie de contrôle proposée dans cette thèse.

Mot-clé : GSAP, Turbine éolienne, Mode glissant, OPE, OLG.

The world consumption of electric energy becomes more and more important in these years. But the consumption of this material essential to modern life poses environmental constraints. To reduce this consumption as soon as possible, the global policy focuses on renewable energies such as wind energy. Nevertheless, the random criterion of the latter forces us to master this system and impose control laws in order to take full advantage of its power and satisfy the needs of the loads. The aim of this work is to improve the quality of the electrical energy extracted from wind energy conversion systems and the design of this variable speed wind system, to produce a direct attack based on a synchronous permanent magnet generator by applying a control strategy. The results obtained demonstrate the effectiveness of this proposed control strategy in terms of robustness for different wind speeds. The study demonstrates the control objective to extract the maximum system energy, the objective formulated as an optimization problem in order to find the controller parameters. To achieve this goal, the use of two techniques was necessary; the PSO (Particle Swarm Optimization) and GWO (Grey wolf Optimization) algorithms to obtain the gain parameters of the controller. The tests of the simulation results are verified under the MATLAB/Simulink tool these tests have demonstrated the effectiveness and reliability of the control strategy proposed in this thesis.

Keywords – PMSG, Wind turbine, Sliding Mode Control, PSO, GWO.

أصبح الاستهلاك العالمي للطاقة الكهربائية أكثر أهمية في هذه السنوات. لكن استهلاك هذه المادة الضرورية للحياة الحديثة يفرض قيودًا بيئية. لتقليل هذا الاستهلاك في أسرع وقت ممكن، تميل السياسة العالمية نحو الطاقات المتجددة مثل طاقة الرياح. ومع ذلك، فإن المعيار العشوائي لهذا الأخير يتطلب منا إتقان هذا النظام وفرض قوانين التحكم من أجل الاستفادة الكاملة من قوته وتلبية احتياجات الأحمال. يتمثل الهدف المعروض في هذا العمل في البحث لتحسين جودة الطاقة الكهربائية المستخرجة من أنظمة تحويل طاقة الرياح وأبعاد هذا النظام لطاقة الرياح بسرعة متغيرة، من أجل إنتاج هجوم مباشر يعتمد على مولد متزامن مغناطيسي دائم من خلال تطبيق استراتيجية تحكم. تقدم النتائج التي تم الحصول عليها دليلاً على فعالية استراتيجية التحكم المقترحة هذه من حيث المتانة لسرعات الرياح المختلفة. توضح الدراسة هدف التحكم لاستخراج الطاقة القصوى من النظام، والهدف الذي تمت صياغته كمشكلة تحسين من أجل العثور على معلمات وحدة التحكم. لتحقيق هذا الهدف، كان من الضروري استخدام تقنيتين؛ خوارزميات PSO (تحسين سرب الجسيمات) و GWO (تحسين الذئب الرمادي) للحصول على معلمات الكسب لوحدة التحكم. تم التحقق من اختبارات نتائج المحاكاة باستخدام أداة MATLAB / Simulink، وقد أظهرت هذه الاختبارات فعالية وموثوقية استراتيجية التحكم المقترحة في هذه الأطروحة.

كلمات مفتاحية: المولود المتزامن ذوي المغنطيس الدائم، توربينات الرياح، التحكم في وضع الانزلاق ، تحسين حشد الجسيمات ، تحسين الذئب الرمادي.

Résumé.....	I
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Introduction générale.....	1
 Chapitre I : Etat d'art de l'énergie éolienne	
I.1 Introduction.....	6
I.2 Le potentiel éolien en Algérie.....	7
I.3 Le préambule du système éolien.....	10
I.3.1 Historique.....	10
I.3.2 Types des aérogénérateurs.....	12
I.3.2.1 Aérogénérateur à axe verticale.....	13
I.3.2.2 Aérogénérateur à axe horizontale.....	13
I.3.2.3 Les deux types d'éolienne.....	14
I.4 L'architecture d'une éolienne.....	16
I.4.1 La tour.....	16
I.4.2 Le rotor.....	17
I.4.3 La nacelle.....	17
I.5 La chaîne de transformation de l'énergie éolienne.....	18
I.5.1 Générateur asynchrone.....	18
I.5.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil.....	18
I.5.1.2 Générateur Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	18
I.5.2 Générateur synchrone.....	19
I.5.2.1 Générateur Synchrone A Rotor Bobiné.....	20
I.5.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents.....	20
I.5.2.3 Les structures de Machine Synchrone à Aimant Permanent.....	21
I.5.2.4 Principe de fonctionnement de la MSAP.....	25
I.6 L'énergie éolienne ses avantages et inconvénients.....	26
I.6.1 Avantages.....	26
I.6.2 Inconvénients.....	26
I.7 Conclusion.....	26
II.1 Introduction.....	29
II.2 Conversion de l'énergie éolienne.....	29
II.2.1 Loi de Betz.....	30
II.2.2 (Tip speed ratio) vitesse spécifique.....	31

Table des matières

II.2.3 Production d'énergie mécanique	32
II.3 Modélisation de la turbine éolienne.....	32
II.3.1 Hypothèses simple pour définir la turbine éolienne.	32
II.3.2 Modèle de l'éolienne	34
II.2.3 Le coefficient de puissance (C_p)	35
II.3.4 Modélisation de vitesse du vent.....	37
II.3.5 Modélisation de l'arbre mécanique.....	38
II.3.6 Dimensionnement de la turbine	38
II.3.7 Résultat de simulation de la turbine.....	40
II.4 Modélisation de la génératrice synchrones à Aimants Permanents.....	41
II.4.1 Mise en équation de GSAP.....	43
II.4.2 Equations électriques	44
II.4.3 Passage au repère de Park.....	44
II.4.4 Modèle de la GSAP dans le repère de Park.....	45
II.5 Modélisation de l'onduleur.....	46
II.5.1 Stratégie de commande des onduleurs par MLI sinus-triangle.....	49
II.6 Résultat de simulation	50
II.6.1 Résultat de simulation de l'onduleur de tension MLI.....	51
II.7 Conclusion	57
III.1 Introduction	59
III.2 Système à structure variable.....	59
III.3 Généralités sur la commande par mode glissant	59
III.4 Conception de la commande par mode glissant	60
III.4.1 Choix de la surface de glissement	61
III.4.2 Conditions d'Existence et de Convergence du Régime Glissant	62
III.4.3 Détermination de loi de commande.....	63
III.4.4 Elimination du phénomène de chattering	65
III.5 Application de la commande par mode de glissement à la GSAP	66
III.5.1 Stratégie de réglage à deux surfaces.....	67
III.5.2 Commande du courant direct (i_d).....	67
III.5.3 Commande du courant quadrature (i_q).....	68
III.6 Simulations.....	69
III.6.1 Test de robustesse vis-à-vis à des variations paramétriques.....	75
III.7 Conclusion.....	77
IV.1 Introduction.....	79
IV.2 Optimisation de système de conversion d'énergie éolienne	80

Table des matières

IV.2.1 Problème d'optimisation	80
IV.2.2 Classification des méthodes d'optimisation	81
IV.2.3 Métaheuristique	82
IV.2.4 Optimisation multi-objectif	82
IV.3 Essaim particulaire optimisation (OEP)	83
IV.3.1 Principe	83
IV.3.2 Modélisation et application du PSO sur contrôleur mode glissant	86
IV.4 Optimisation par les loups gris (GWO)	88
IV.4.1 Modélisation et application du GWO sur contrôleur mode glissant	89
IV.5 Résultat de simulations	92
IV.5.1 Données de vent et analyse de site	93
IV.5.2 La méthode d'optimisation	94
IV.6 Conclusion	100
<i>Conclusion générale</i>	101

Liste des figures

Figure I. 1: Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol réalisée par [17].	8
Figure I. 2: Comparaison de vitesse moyenne des sites ventés [17].	9
Figure I. 3 : Puissance récupérable et utiliser à 10m et 25m [23].	10
Figure I. 4 : Le système éoliennes.	11
Figure I. 5: Capacité d'énergie éolienne (en mégawatt) installée dans le monde durant les dernières années [26].	12
Figure I. 6: Les types des éoliennes a axe verticale.	13
Figure I. 7: Aérogénérateur à axe horizontal.	14
Figure I. 8: Eolienne aval et amont.	14
Figure I. 9: La tour du l'éolienne.	17
Figure I. 10: Le rotor d'une éolienne.	17
Figure I. 11: La nacelle d'une éolienne.	18
Figure I. 12: MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).	19
Figure I. 13: MSAP (Machine Synchrone à Aimant Permanent).	20
Figure I. 14: Vue schématique des machines à champ radial et axial.	21
Figure I. 15: Topologies simplifiées du moteur MSAP : a) rotor externe, b) rotor interne.	22
Figure I. 16: Structure à aimant déposer en surface (rotor interne).	22
Figure I. 17: Structure à aimant encastrés.	22
Figure I. 18: Structure à aimant enterrés : a) avec concentration de flux, b) structure classique.	23
Figure I. 19: Rotor synchrone a aimant enterrée.	23
Figure I. 20: Structure axiale simple avec un rotor et un stator.	24
Figure I. 21: Structure a flux axial avec double rotor et un stator.	24
Figure I. 22: Structure à aimantation axial avec double stator et un rotor.	24
Figure I. 23: Caractéristique du couple-angle électrique.	25
Figure II. 1: Structure du système de conversion de l'énergie éolienne.	29
Figure II. 2: Colonne d'air se déplaçant à la vitesse v .	30
Figure II. 3: Tube d'écoulement autour d'une éolienne (théorie de Betz).	30
Figure II. 4: Vitesse tangentielle de l'aubage (Ωr) et vitesse de vent (V).	32
Figure II. 5: Système mécanique de l'éolienne.	33
Figure II. 6: Modèle simplifié de la turbine.	34
Figure II. 7: Schéma du système à modéliser.	35
Figure II. 8: C_p - λ caractéristiques pour différentes valeurs de β .	36
Figure II. 9: La vitesse du vent.	38
Figure II. 10: Modèle de l'arbre de l'éolienne.	38
Figure II. 11: Simulation de la turbine cas d'une vitesse fixe.	40
Figure II. 12: Simulation de la turbine cas d'une vitesse variable.	41
Figure II. 13: Exemple d'un générateur synchrone à aimants permanents de petite éolienne.	42
Figure II. 14: Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent.	43
Figure II. 15: GSAP à modéliser.	43
Figure II. 16: Représentation de la MSAP dans le repère (d,q) de Park.	44
Figure II. 17: circuit équivalent de la génératrice synchrone à aimants suivant les axes (d, q) dans un référentiel lié au rotor.	45
Figure II. 18: Schéma de l'onduleur et son modèle.	47
Figure II. 19: La chaîne de conversion.	50
Figure II. 20: Alimentation triphasé.	50
Figure II. 21: La vitesse de vent fixe.	51

Liste des figures

Figure II. 22: La vitesse de vent variable.	51
Figure II. 23: La tension de l'onduleur.	52
Figure II. 24: Résultat de la chaine cas d'une vitesse fixe.	54
Figure II. 25: Résultat de la chaine cas d'une vitesse variable.....	56
Figure III. 1: Les modes de trajectoire dans le plan de phase.	60
Figure III. 2: Linéarisation exacte de l'écart.	62
Figure III. 3: Trajectoire d'état pour la surface.....	63
Figure III. 4: La valeur de la commande ueq lors de la commutation entre uMax et uMin.....	64
Figure III. 5: Représentation de la fonction « sgn ».....	65
Figure III. 6: Fonction « Sat ».	66
Figure III. 7: Fonction « Smooth ».	66
Figure III. 8: Schéma du système proposé.	67
Figure III. 9: La vitesse du vent fixe.	69
Figure III. 10: La vitesse du vent variable.....	69
Figure III. 11: La référence du courant statorique Iq.	70
Figure III. 12: SMC vent fix sans onduleur.	71
Figure III. 13: SMC vent variable sans onduleur.	72
Figure III. 14: SMC vent fixe avec onduleur.	74
Figure III. 15: SMC vent variable avec onduleur.....	75
Figure III. 16: SMC vent variable avec onduleur.....	76
Figure IV. 1: Différence entre un optimum global et des optima locaux.....	81
Figure IV. 2: organisation dans les systèmes biologiques : (a) Une colonie de fourmis qui ramène de la nourriture vers le nid (b) un essaim d'abeilles (c) un vol groupé d'oiseaux (d) une formation de bactéries [77].	84
Figure IV. 3: Schéma de Déplacement d'une particule.	85
Figure IV. 4: Organigramme de PSO-SMC.	87
Figure IV. 5: L'organigramme de l'optimisation du loup gris (PSO).	88
Figure IV. 6: Performance de chasse du loup gris : (A) suivre, approcher la proie (B) encercler et harceler (C) l'attaque.	89
Figure IV. 7: vecteurs de position et leurs prochains emplacements possibles.	91
Figure IV. 8: Mise à jour de position dans GWO.	91
Figure IV. 9: Attaquer une proie contre chercher une proie.	92
Figure IV. 10: Site géographique d'Adrar.	93
Figure IV. 11: Station NEAL installée à l'URERMS Adrar.	93
Figure IV. 12: Vitesse du vent réel.	94
Figure IV. 13: Résultat de simulation PSO-SMC.	95
Figure IV. 14: Résultat de simulation GWO-SMC.	96
Figure IV. 15: Le spectre des harmoniques d'étage de courant du stator avec PSO.	99
Figure IV. 16: Le spectre des harmoniques d'étage de courant du stator avec GWO.	99

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Présentation des premiers pays en matière d'énergie éolienne [26].....	13
Tableau I. 2: Les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe-variable.....	17
Tableau II. 1: Cahier de charge.....	41
Tableau II. 2: Etablissement des expressions des tensions simples et composées.....	51
Tableau IV. 1: Algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP).....	88
Tableau IV.2 Analyse statique.....	100

Liste des abréviations

<i>GSAP</i>	<i>Génératrice synchrone à aimant permanent</i>
<i>GWO</i>	<i>Grey wolf optimization</i>
<i>IEA</i>	<i>Integral of Absolute Error</i>
<i>ITAE</i>	<i>Integral Time Absolute Error</i>
<i>ITSE</i>	<i>Integral Time Square of The Error</i>
<i>ISE</i>	<i>Integral Square of the Error</i>
<i>HAWT</i>	<i>Horizontal Axis Wind Turbines</i>
<i>PSO</i>	<i>Particle swarm optimization</i>
<i>VAWT</i>	<i>Vertical Axis Wind Turbines</i>

Introduction générale

L'utilisation des combustibles fossiles est l'une des plus grandes menaces pour toute vie sur la terre. Les solutions à cette menace deviennent une urgence mondiale. Les chercheurs dans le domaine énergétique estiment que le palliatif à cette source d'énergie polluante provient des sources d'énergie renouvelables. Aujourd'hui, l'énergie éolienne devient l'une des sources d'énergie renouvelable des plus avancées et les plus importantes, elle est considérée comme la source à la croissance la plus rapide [1].

Les activités des éoliennes ont augmentées en 2021 de plus de 88 GW de capacité éolienne attribués dans le monde, soit 153 % de plus qu'en 2020 [2].

La position géographique de l'Algérie offre divers avantages pour l'exploitation à grande échelle de la plupart des ressources renouvelables. Dans ce sens, la politique de protection de l'environnement de l'Algérie opte pour l'utilisant des sources des énergie renouvelables ; l'énergie éolienne, et l'énergie solaire, pour satisfaire la demande énergétique croissante. Pour cela le nouveau programme gouvernemental prévoit l'installation de 22 000 MW de capacité d'énergie renouvelable d'ici 2030, représentant 40 % de la consommation totale d'énergie. Ce programme éliminerait progressivement l'utilisation des énergies à base de combustibles de fossiles (gaz naturel et pétrole), désormais source principale de production d'électricité dans le pays, selon les auteurs dans [3, 4].

Dans son dernier rapport intitulé "Évaluer la capacité installée d'énergies renouvelables par la fin décembre 2021 » le CEREFÉ (Commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique) souligner que La capacité installée d'énergies renouvelables à fin décembre 2021, prenant en compte l'ensemble des projets raccordés et non raccordés au réseau, s'élève à 567,1 MW, dont 438,2 MW hors hydroélectricité. Ainsi, on dénombre la capacité de 27,6 MW qui provient des nouvelles installations d'énergies renouvelables, soit une augmentation de +7% par rapport au niveau cumulé à fin décembre 2019" [5].

D'après le rapport de l'atlas éolienne algérien, la capacité éolienne exceptionnelle se situe dans la région du sud-ouest de l'Algérie, précisément à Adrar, ce qui est plus bénéfique pour l'établissement de parcs éoliennes étant donné que la vitesse du vent dépasse 6 m/s. Ainsi l'installation du parc éolienne d'Adrar (Kabertene) devrait produire de l'électricité être de 10 MW [3, 4, 6].

Ainsi ; le but de cette étude est de proposer un contrôle adapter sous la vitesse réelle du vent de la région d'Adrar. Le modèle proposé est basé sur une génératrice synchrone à aimants permanents directement entraînée par la turbine classique à trois pales à axe horizontal. Une

éolienne est classée suivant le type de générateur ; générateur électrique comme le générateur asynchrone ou générateur synchrone. À titre d'illustration, un générateur asynchrone est fréquemment utilisé dans la conversion à vitesse variable ; en outre, un générateur synchrone est utilisé pour une vitesse constante. De plus, pour la de transformation de l'énergie éolienne, les générateurs doivent conduits à un profit énergétique maximal (moteur à induction, générateur synchrone à aimant permanent, générateur asynchrone, générateur synchrone) [7].

Au milieu de tous ces générateurs, la génératrice synchrone à aimant permanent est la plus célèbre et écrasant dans la part de marché en raison des préférences notables comme la structure moins difficile, exceptionnellement moins de coût, la capacité de suivre le contrôle le plus extrême et la facilité à travailler à des variables de contrôle plus élevées, les éoliennes basés sur le PMSG ont été largement utilisés a pris de l'importance [8].

Dans la référence [9], les auteurs ont proposé de commander les courants statoriques du GSAP, les contrôleurs PI classiques sont largement utilisés en raison de leur clarté et puisque la théorie de la commande linéaire est effectivement réussie. Ces contrôleurs, en revanche, ont plusieurs défauts ; cette approche ne peut pas fournir des performances beaucoup plus élevées. D'autres approches de contrôle ; le contrôle par mode glissant, le contrôle par la logique floue et le contrôle par retour en arrière peuvent être utilisées pour résoudre ce problème. SMC est un format variable de contrôle qui est à la base un format non linéaire qui a été développé au début des années 1950 [10]. Plusieurs articles ont paru dans des ouvrages publiés traitant de l'application du contrôle par le mode glissant au système de conversion d'énergie GSAP-éolienne. Dans la réf. [11], l'application d'un IWO-SMESC pour le contrôle du système de conversion de l'énergie éolienne a été réalisée, où les statistiques démontrent la viabilité de l'approche suggérée.

Les auteurs dans la référence [12] discutent d'une étude comparative des contrôleurs SMC et PI GSAP. Les résultats indiquent que SMC offre divers avantages, notamment la robustesse, la haute précision des données et la stabilité des résultats.

Dans la référence [13], Errami et al. a suggéré un contrôle MPPT pour un parc éolienne connecté au réseau basé sur GSAP et 5L-NPC. Les approches suggérées ont été illustrées par des résultats de simulation pour un GSAP basé sur des cultures éoliennes de 4 MW. Les auteurs de la référence [14] présentent un SMC d'ordre supérieur (HOSMC) avec des gains optimaux. Le contrôleur amélioré l'efficacité cruelle de la turbine tout en minimisant la proportion crête-

moyenne de la puissance de rendement. Comparé aux contrôleurs traditionnels, le contrôleur semble avoir moins de broutages et de contraintes de temps.

Le Projet de ce travail est de contrôler directement le stator et les courants d'axe en quadrature pour minimiser le phénomène de broutage. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons deux algorithmes d'optimisation PSO (Particle Swarm Optimization) et GWO (Grey Wolf Optimization) pour obtenir les paramètres de gains du contrôleur. L'analyse de la robustesse et de la réactivité de l'approche recommandée du système a été réalisée sous la vitesse réelle du vent de la région de l'Adrar (sud de l'Algérie) les résultats de la simulation sont testés sous l'outil MATLAB/Simulink.

Pour réaliser cette étude la thèse sera diviser en quatre chapitres comme suit :

Le chapitre un est consacré à une généralité sur les énergies éoliennes à travers l'échelle du territoire Algérien, des concepts physiques régissant leur fonctionnement. Cette généralité est suivie par un état de l'art des différentes méthodes utilisées pour produire de l'électricité. Ensuite une partie décrit les éoliennes, les différents types leurs composants et méthodes de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable). La dernière partie aborde les combinaisons des différentes machines électriques utilisées pour convertir l'énergie éolienne seront étudiées et comparées selon différents avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est destiné à l'étude du système de conversion, ce système est divisé en deux parties ; la première partie est consacré à la modélisation et le dimensionnement de la turbine éolienne, la deuxième partie traite la modélisation de la GSAP et l'onduleur MLI.

Le troisième chapitre est consacré à la stratégie de commande non linéaire par mode glissant et appliquée au contrôle du courants statorique produit par la GSAP dans le système de conversion d'énergie éolienne. La stratégie choisie est appliquée pour atteindre des objectifs définis ; c'est-à-dire qu'un contrôle puissant conduit à une fiabilité accrue d'efficacité énergétique.

Le dernier chapitre décrit les deux algorithmes d'optimisation essaim particulaire (PSO) et loup gris (GWO) comme des nouveaux algorithmes méta-heuristiques pour trouver les paramètres optimaux (K_d, K_q) lorsqu'on utilise le contrôleur par mode glissant appliqué à une génératrice synchrone à aimant permanent utilisé dans un système de conversion d'énergie éolienne

Enfin, la thèse est clôturée par une conclusion générale résumant les résultats les plus significatifs, ainsi que les perspectives envisagées.

Chapitre I :

*Etat d'art de l'énergie
éolienne*

I.1 Introduction

Les énergies fossiles inculpés être le premier responsable du changement climatique et contribuent également fortement à la perte de biodiversité et à la pollution mondiale. Passer des combustibles fossiles aux énergies renouvelables est une étape nécessaire et faire des énergies renouvelables la norme n'est pas une question de technologie ou de coût.

Le secteur de l'électricité a fait des progrès remarquables. Aujourd'hui, presque tous les nouveaux équipements électriques sont renouvelables. Plus de 256 GW ont été ajoutés dans le monde en 2020, dépassant le record précédent de près de 30 %. Dans un nombre croissant de régions, dont certaines parties de la Chine, de l'Union européenne, de l'Inde et des États-Unis, il est désormais moins cher de construire de nouvelles centrales éoliennes ou solaires que d'exploiter des centrales au charbon existantes. Ces progrès peuvent et doivent être répercutés sur tous les autres domaines [15].

La hausse de la demande mondiale d'énergie a compensé la croissance du déploiement des énergies renouvelables. En conséquence, la part des combustibles fossiles dans la consommation finale totale d'énergie (TFEC) est restée pratiquement la même depuis 2009.

Les énergies renouvelables ont répondu à un peu plus de 12,6 % de la demande finale d'énergie mondiale en 2020, contre seulement 10,6 % en 2009. Même la part des énergies renouvelables dans la demande finale d'électricité a stagné en 2020, par rapport à 2019.

Malgré des ajouts records à la capacité d'énergie renouvelable en 2021, la hausse de la demande mondiale d'électricité a été satisfaite principalement par les combustibles fossiles.

Pour la production d'électricité, la consommation de charbon a augmenté de 9 %, comparativement à une augmentation de 5 % pour les énergies renouvelables. De plus, les progrès ont été inégaux d'une région à l'autre. En 2019, seulement 3 pays sur 80 – Islande, Norvège et la Suède – détenait des actions renouvelables dans TFEC à plus de 50 %,

En outre, 20 pays, principalement en Europe et en Amérique latine, ont atteint au moins un quart de leur consommation finale totale d'énergie à l'aide d'énergies renouvelables [16].

Ce chapitre présente d'abord un aperçu des perspectives d'approvisionnement énergétique, de production d'énergies renouvelables et notamment de l'énergie éolienne. La deuxième partie décrit les éoliennes, leurs composants, leurs différents types et leurs stratégies de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable).

La dernière partie aborde les combinaisons des différentes machines électriques utilisées pour convertir l'énergie éolienne seront étudiées et comparées selon différents avantages et inconvénients.

Les différentes techniques de limitation ou de contrôle de ce pouvoir sont ensuite brièvement expliquées. Différentes constructions de générateurs disponibles sur le marché Enfin, nous précisons le choix du type d'éolienne qui nous permettra de définir le cadre de notre travail ; signifie la complexité des commandes pour la turbine et pour le générateur de l'éolienne.

I.2 Le potentiel éolienne en Algérie

La production de l'énergie algérienne par le système de l'éolienne a le plus grand potentiel en Afrique du Nord. Des études préliminaires des variations saisonnières annuelles de la vitesse du vent nous ont permis la détermination des régions les plus venteuses d'Algérie. Cette représentation sous forme de carte de la vitesse sert à deux fins :

Identifier les vastes zones présentant de bonnes perspectives de développement de l'énergie éolienne. Souligner les fluctuations relatives des ressources Algériennes.

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) a des estimations qui sont basées sur des données horaires et trihoraires de vitesse du vent enregistrées en continu pendant 10 ans de 2004 / 2014 dans les 74 stations météo de l'ONM en plus des 21 stations météo supplémentaires des pays voisins (Fig I.1) [17].

En raison de la répartition géographique plus ou moins uniforme des vents entre le nord et le sud, selon le nouvel atlas éolien installé à 10 m d'altitude du sol démontre les changements des estimations des ressources éoliennes au Sahara en particulier.

Par exemple ; le site d'Insalah affiche une vitesse moyenne de 6 m/s celui d'Adrar enregistrant une vitesse moyenne plus longue 6,3 m/s. La Wilaya d'Illizi, avec des douzaines de stations enregistrant une vitesse moyenne, supérieures à 5 m/s.

La vitesse moyenne sur le site Hassi R'Mel est assez élevée avec un maximum de 6,5 m/s. Allons au nord, certains microclimats d'ouest et de l'est sont également détectés. Dans les régions de Mescheria, Tiaret et Djelfa une vitesse moyenne intéressante de 5,6 m/s est enregistrée , un peu plus à l'est, ont respectivement des vitesses de 5,6 m/s et 5,1 m/s. M'Sila se présente comme une zone intéressante avec une vitesse moyenne annuelle de 5,3 m/s.

Les sites, comme Tébessa, Ksar-Chellala, Bou Saada, ont des pourcentages de valeurs minimales de moins cinquante pourcent (>50%).

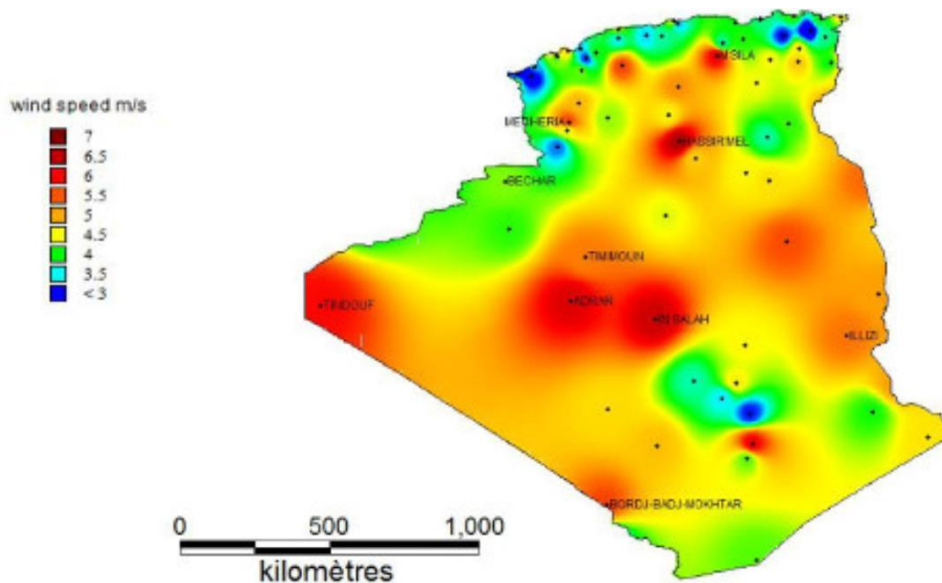


Figure I. 1: Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol réalisée par [17].

Même les informations données par l'atlas vents de l'Algérie qui quantifier le potentiel existant reste encore insuffisant pour choisir les emplacements appropriés pour la construction des parcs éoliens ; la recherche de ces sites capables d'assurer la rentabilité et de fournir une puissance éolienne compétitive. La méthode de systèmes d'information géographique (GIS) basée sur la superposition de strates [18] (Fig. I.2) vient de déterminer les emplacements idéaux en Algérie.

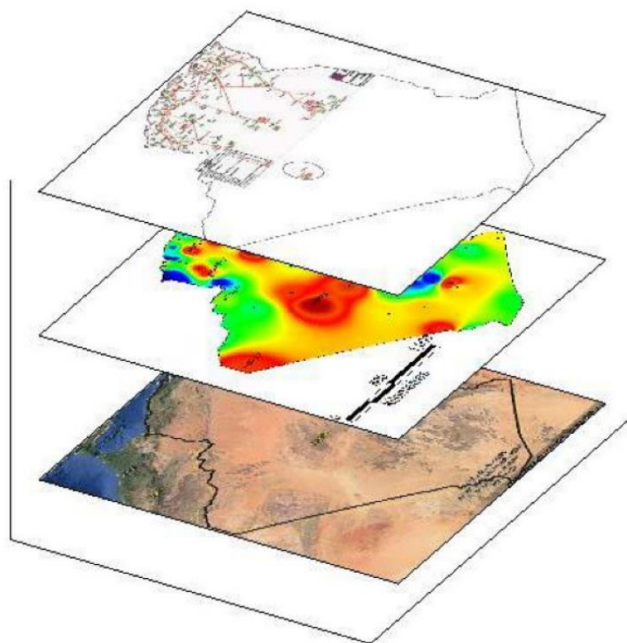


Figure I. 2: Comparaison de vitesse moyenne des sites ventés [17].

Adrar se situe dans un couloir de vent de 6 m/s, dont les recherches ont montré qu'il peut atteindre jusqu'à 20 m/s, de sorte que le potentiel énergétique est substantiel et très bon.

L'éolienne d'Adrar est la première éolienne constituée en Algérie qui a été installée en 1953 sur le terrain de l'INRAA situé à quelques km d'Adrar au lieu-dit Ouled Aissa commune de Ould Brahim.

La capacité totale installée d'énergie éolienne d'ici 2030 est fixée à 5010 MW, atteignant 1 GW entre 2015 et 2020. A noter également qu'à l'horizon 2020 le réseau Adrar sera raccordé au réseau Nord. Selon le rapport de mise en œuvre présenté par SKTM, la capacité totale installée est de 10 MW (parc éolien de Kaberten). De plus, il y a la possibilité de Janet et Insalah. Une étude plus approfondie de ces nouveaux domaines est nécessaire. Dix mâts de mesure du vent seront installés à cet effet. Par conséquent, le choix de l'emplacement du futur parc éolien ne se fera que plus tard.

Kabertene est le premier site central électrique en Algérie qui est située à 72 km au nord de la capitale d'Adrar. Ce parc éolien a été mis en service début juin 2014 et inauguré le 3 juillet 2014. Ce projet a été réalisé pour fournir une puissance de (10,2 MW d'éoliennes au total) il se compose de 12 turbines Gamesa G52 avec un diamètre de 52 mètres et une hauteur du mât de 55m. Les éoliennes sont fixées sur un site d'une superficie totale de 33 hectares. Ce dernier a été réalisé par deux Groupe SONEL GAZ sous l'expertise de CEGELEC (ETTERKIB

Equipment Assembly et ENERGA Civil Engineering) pour un chiffre global de 2,8 milliards dinars [19,20].

Ce projet fournit une énergie électrique qui alimentera le réseau local. Les registres de production d'énergie éolienne montrent que la quantité d'énergie produite par jour donné a atteint la puissance de sortie nominale du parc. Le système SCADA fait le contrôle et la communication entre la chambre de contrôle et la turbine se fait via des câbles à fibres optiques.

Le parc éolien de Kaberten est un premier en Algérie. Il s'agit donc d'un parc pilote où un retour d'expérience général est attendu, notamment sur le comportement des éoliennes sous l'influence des températures élevées et des tempêtes de poussière [21,22]. La figure ci-dessous (Fig. I.3) montre l'énergie éolienne réalisable et utilisable à 10 et 25 mètres pour différents sites, dont Adrar.

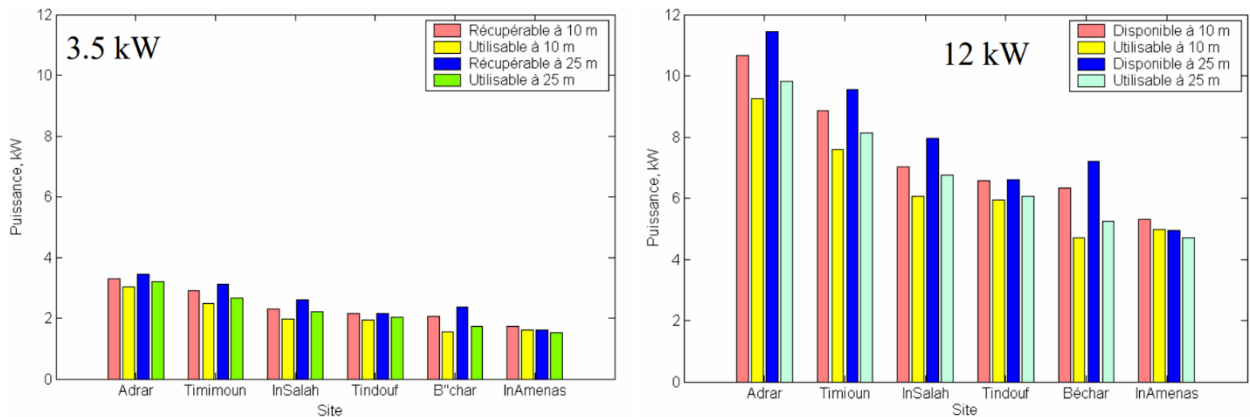


Figure I. 3 : Puissance récupérable et utilisable à 10m et 25m des différentes zones [23].

I.3 Le préambule du système éolien

I.3.1 Historique

Pendant des décennies, les humains ont utilisé l'énergie éolienne pour déplacer les bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Cette technologie ancestrale est utilisée aujourd'hui pour fabriquer de l'électricité.

La production de l'énergie de l'éolienne techniquement bien développée, est en plein essor, Que ce soit à une seule échelle avec de petites éoliennes ou à grande échelle avec de grandes éoliennes, l'énergie éolienne peut permettre de diversifier la production d'électricité de manière décentralisée, en générant directement zéro pollution ni CO2 [24].

Les ressources éoliennes proviennent du mouvement des masses d'air indirectement dû au rayonnement solaire de la Terre. Lorsque certaines régions de la planète sont chaudes et d'autres froides, des différences de pression se produisent et la masse d'air se déplace de manière constante (Fig. I.4) [25].



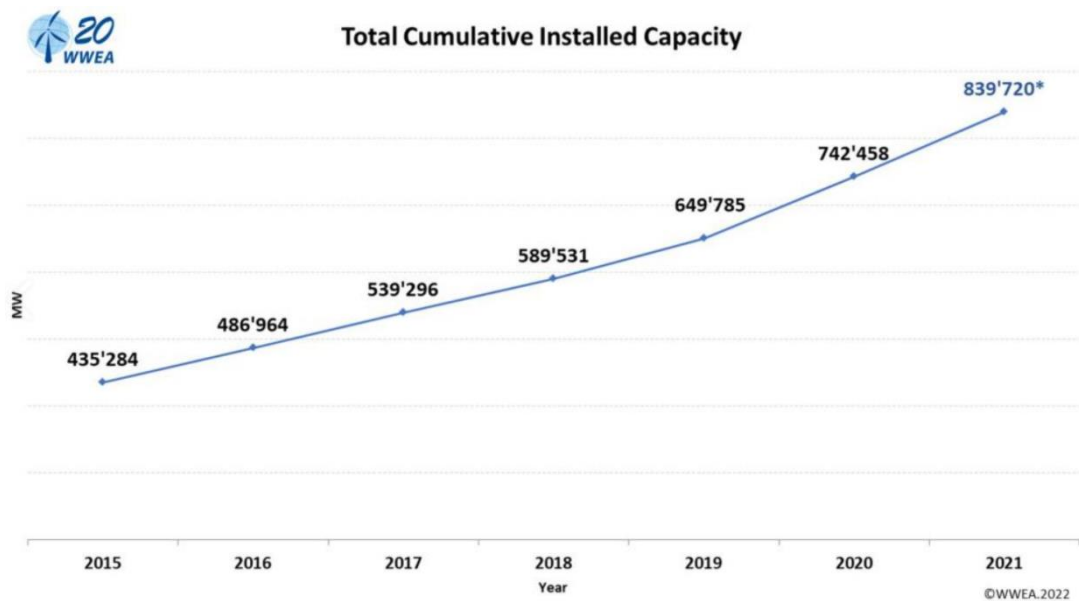
Figure I. 4 : Le système éoliennes.

Selon les données préliminaires publiées le 18 mars 2022 par la WWEA (World Wind Energy Association), le marché mondial des éoliennes atteindra un nouveau sommet en 2021, avec des éoliennes d'une capacité totale de 97,5 gigawatts installées dans le monde, en hausse de 92,7 Gigawatt en 2020. La puissance combinée de toutes les éoliennes dans le monde a maintenant dépassé 840 Gigawatt (contre 742,5 Gigawatt en 2020), assez pour répondre à plus de 7 % des besoins mondiale d'électricité.

Cela équivaut à un taux de croissance de 13 %, contre 14 % il y a un an et 10 % en 2019 [26]. Le tableau I.1 classe les pays utilisant le plus l'énergie produite par l'éolienne dans le monde en 2021. La figure I.5 montre l'énergie produite par l'éolienne installée dans le monde au cours des 6 dernières années.

Tableau I. 3: Présentation des premiers pays en matière d'énergie éolienne [26].

Country	2021	New capacity 2021	Growth Rates 2021	2020	2019	2018
China	343'829	55'800	19.4%	288'029	236'029	209'529
United states	134'846	12'518	10.2%	122'382	105'433	96'363
Germany	63'924	1'716	2.8%	62'208	61'357	59'313
India	40'100	1'475	3.8%	38'625	37'529	35'129
Spain	28'196	750	2.7%	27'446	25'808	23'494
United Kingdom	26'812	2'645	10.9%	24'167	23'515	20'743
Brazil	21'365	3'355	18.6%	18'010	15'452	14'707
France	19'081	1'132	6.3%	17'949	16'646	15'313
Canada	14'304	677	5.0%	13'627	13'413	12'816
Sweden	12'097	2'175	21.9%	9'922	8'985	7'406
Rest of the world	135'166	15'019	12.5%	120'147	105'618	94'719
Total	839'730	97'272	13.1%	742'458	649'785	589'547

**Figure I. 5:** Capacité d'énergie éolienne (en mégawatt) installée dans le monde durant les dernières années [26].

I.3.2 Types des aérogénérateurs

Les éoliennes, fréquemment appelées turbines, sont les équipements essentiels des systèmes de conversion de l'énergie. Au fil des années, différents types de turbines ont été développés. Cette section donne un aperçu de la technologie des turbines [27,28]

I.3.2.1 Aérogénérateur à axe verticale

Les aérogénérateurs à axe vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) sont la première structure développée pour générer de l'électricité par opposition aux éoliennes traditionnelles à axe horizontal. Ils ont l'avantage d'avoir le contrôleur et le générateur au niveau du sol afin qu'ils soient facilement accessibles [28]. Plusieurs prototypes sont apparus mais trois types ont atteint le stade de l'industrialisation la figure 1.6 [29].

- a. Le Savonius.
- b. Le Darrieus.
- c. Le Musgrove .

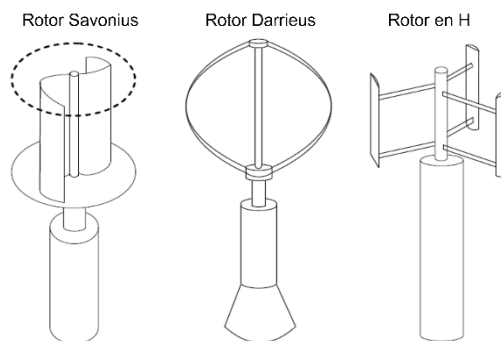


Figure I. 6: Types des trois éoliennes a axe verticale.

I.3.2.2 Aérogénérateur a axe horizontale

Les turbines à axe horizontal (Fig. I.7), également appelées HAWT, sont les plus courantes. Les pales du rotor sont positionnées pour capter le flux d'air et sont utilisées pour générer un couple. Ce dernier permet de piloter des générateurs qui produisent l'électricité. Totalement autonomes au démarrage, économiques, moins encombrantes au sol ; ces éoliennes ont typiquement trois pales et peuvent livrer des mégawatts de puissance [30].



Figure I. 7: Aérogénérateur à axe horizontal.

La turbine peut être positionnée à l'avant de la nacelle ou à l'arrière Figure 1.8 : face au vent (Upwind) ou sous le vent (Downwind)[29].

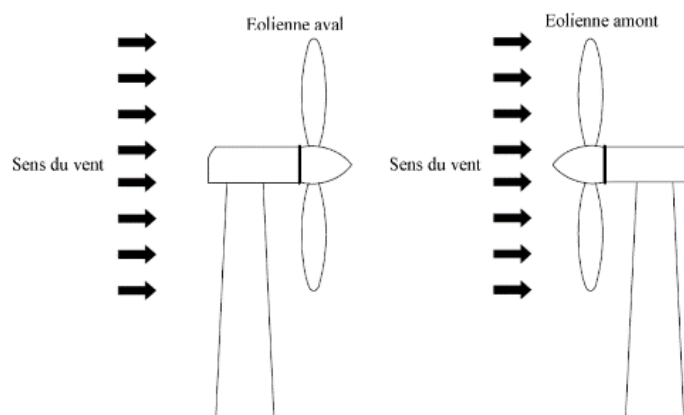


Figure I. 8: Eolienne aval et amont.

Les éoliennes à axe horizontal simultanément sont les plus utilisées car elles ont moins de contraintes mécaniques et sont moins chères par rapport aux éoliennes à axe vertical.

I.3.2.3 Les deux types d'éolienne

Les éoliennes sont également divisées en deux classes en termes de vitesse ; Vitesse fixe ou vitesse variable. Une éolienne à vitesse fixe tourne à une vitesse quasi constante déterminée par le facteur de gain, le nombre de pôles du générateur et la fréquence du réseau.

Le rendement de la transformation maximale ne peut être atteint qu'à certaines vitesses de vent (constantes), d'autres vitesses de vent entraînent une efficacité inférieure du système. Des guides aérodynamiques sur les pales protègent la turbine des dommages potentiels causés par de fortes rafales de vent. De plus, la turbine tournant à faible vitesse, il est nécessaire d'utiliser un engrenage d'accélération (multiplicateur).

Les turbines à vitesse fixe produisent une énergie de sortie très variable sur le réseau et provoquent des perturbations. Ce type de turbine nécessite également une conception mécanique robuste pour pouvoir supporter des charges mécaniques élevées [31].

En revanche, les éoliennes à vitesse variable atteindront une efficacité de conversion de puissance maximale sur une large vitesses de vent. La régularisation de la vitesse de l'éolienne se fait par l'intermédiaire de convertisseurs statiques pour contrôler la vitesse de l'alternateur qui sont couplés mécaniquement au rotor (pale) de l'éolienne connectée au réseau électrique.

Le tableau 1.2, démontre les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable. Ce tableau divise le mode de vitesse par l'augmentation de l'efficacité de la production d'énergie et de la qualité de l'énergie développée par la technologie de conversion d'énergie. Ce mode réduit également les contraintes mécaniques. D'autre part, l'utilisation de convertisseurs de puissance dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne augmente à la fois les coûts du système et les pertes de puissance (rectification et conduction). Toutefois, les surcoûts sont compensés par une grande autonomie.

Tableau I. 4: Les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe-variable.

Mode de Vitesse	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Faible cout et faible maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de conversion d'énergie faible. • Grand stress mécanique • Grande fluctuation de puissance vers le réseau
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de conversion d'énergie élevé • Amélioration de la qualité de puissance • Stress mécanique réduit 	<ul style="list-style-type: none"> • Cout et pertes supplémentaires à cause d'utilisation des convertisseurs de puissance

		<ul style="list-style-type: none">• Le contrôle du système est plus complexe
--	--	--

I.4 L'architecture d'une éolienne

A notre temps, presque toutes les connectées au réseau sont des arbres horizontaux à trois pales. A cet égard, cette section démontre les principaux éléments des éoliennes à axe horizontal.

Les éoliennes à axe horizontal sont composées de trois éléments de base :

- Tour ou mât ;
- Rotor ;
- Nacelle, dont la fonction est de loger les composants qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique, en particulier le générateur [32].

I.4.1 La tour

La tour (Fig. I.9) est l'élément sur lequel sont fixer les principaux éléments : le rotor et la nacelle. Il s'agit d'un tuyau en acier pour assurer la solidité nécessaire de l'ensemble. Il doit être élevé le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, le poids de

la tour doit être en conséquent pour supporter l'ensemble des éléments constituent l'éolienne. Plus le rotor est haut, meilleures sont les performances de l'éolienne.



Figure I. 9: La tour de l'éolienne.

I.4.2 Le rotor

Le rotor (Fig. I.10) est la partie mécanique qui convertit la force motrice du vent, captée par les pales du rotor en rotation et convertie en électricité à l'intérieur de la nacelle. Il se compose généralement de trois pales et se positionne devant la nacelle [33].



Figure I. 10: Le rotor d'une éolienne.

I.4.3 La nacelle

La nacelle (Fig. I.11) contient tous les éléments mécaniques servant à relier l'éolienne au générateur : arbres basse vitesse (LSS : Low Speed Shaft) et grande vitesse (HSS : High Speed Shaft), roulements, engrenages système en cas de surcharge Freins à disque et freins aérodynamiques qui peut arrêter. Les générateurs sont généralement des machines synchrones ou asynchrones.



Figure I. 11: La nacelle d'une éolienne.

I.5 La chaîne de transformation de l'énergie éolienne

L'utilisation courante des turbines actuellement est la production d'énergie électrique. L'utilisation de l'électromécanique est essentielle pour cela. Divers types de machines électriques sont utilisées pour produire de l'énergie des turbines. Des facteurs économiques et techniques déterminent le type de machine pour l'application respective. A faible puissance (<20 kW), la simplicité et le faible coût des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leurs avantages. Pour les applications à haute puissance jusqu'à 2 MW, les générateurs asynchrones sont plus populaires et moins chers [34,35].

I.5.1 Générateur asynchrone

Les générateurs à induction sont souvent utilisés dans l'éolienne de moyenne et grande capacité en raison de leur durabilité, de leur mécanique simple et de leur faible coût. Son principal inconvénient est l'achèvement de courant réactif de l'aimantation au stator. [36,37]

I.5.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

Les générateurs à induction à cage d'écureuil sont principalement choisis pour leur simplicité, leur rendement élevé et leur faible maintenance. La demande de puissance réactive est compensée en connectant un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur ou en mettant en œuvre un convertisseur de puissance statique [38].

I.5.1.2 Générateur Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation (Fig. I.12) a été créée pour un fonctionnement moteur sur une large vitesse. MADA permet de faire varier la vitesse en agissant sur la fréquence d'alimentation des bobinages du rotor. Générateur asynchrone à double

alimentation évite ainsi l'installation d'un convertisseur entre le réseau et le rotor, diminuant l'encombrement d'environ 70 %.

Le fonctionnement de la MADA en mode générateur, l'alimentation est accordée en fréquence sur le circuit du rotor permettant de fournir une fréquence fixe voire une vitesse variable au stator. Cette activité introduit MADA dans de nombreux systèmes de génération distribuée en tant qu'alternative importante aux machines asynchrones traditionnelles. [37,33] :

- Création d'un réseau sur un navire ou une machine à la volée ;
- Centrale hydraulique à débit et vitesse variables
- Eolienne ou hydrolienne à vitesse variable ;
- Le groupe électrogène a la capacité de décélérer en cas de faible consommation ce qui réduit considérablement la consommation de carburant.



Figure I. 12: MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).

I.5.2 Générateur synchrone

L'avantage des générateurs synchrones par rapport aux générateurs asynchrones c'est l'absence de courant réactif pour l'aimantation. Le champ magnétique dans les générateurs synchrones peut être produit soit par des aimants, soit par des enroulements d'excitation conventionnels. Lorsque le générateur a suffisamment de pôles, il peut être utilisé pour des applications à rotation directe sans engrenage. Cependant, SG est mieux adapté pour se connecter indirectement au secteur via un convertisseur statique qui permet une action à vitesse variable. Pour les petites unités, un générateur à aimant permanent (GSAP) est plus simple et moins cher[39].

I.5.2.1 Générateur Synchron A Rotor Bobiné

Un raccordement direct au secteur signifie que la GS fonctionnera à une vitesse constante. Cette vitesse est déterminée à la fréquence du réseau et la quantité du pôle de la machine. L'excitation du est soit à balais annulaires, soit sans balais avec un commutateur rotatif. La mise en œuvre du variateur dans un système multipolaire sans engrenage permet un variateur de vitesse direct. Cette solution implique l'utilisation de générateurs et de convertisseurs surdimensionnés pour s'adapter à la puissance nominale totale du système [39].

I.5.2.2 Générateur Synchron à Aimants Permanents

Le générateur synchrone à aimants permanents est le générateur le plus utiliser dans la classe des petites turbines du a son faible coût et sa simplicité, et a ces propriétés automatique qui lui permettent de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et une bonne efficacité.

Dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs représentations, notamment en termes de moments de masse, sont très intéressantes lorsqu'elles sont en nombre extrêmement grand. Lorsque leur fréquence n'est pas compatible avec la fréquence du réseau, un convertisseur de fréquence est bien sûr nécessaire. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont à vitesse variable [40,41].



Figure I. 13: MSAP (Machine Synchrone à Aimant Permanant).

Les avantages du MSAP :

- La capacité d'extraction est optimisée pour les vents faibles et moyens ;
- Pas de boîte de vitesses ;
- Activité à vitesse variable sur toute la plage de vitesse;
- Les pertes joules et les pertes fer sont localisées au stator ;
- Pas d'échauffement au rotor ;

I.5.2.3 Les structures de Machine Synchrones à Aimant Permanent

Les structures de machines synchrones à aimants sont classées selon la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différents aspects comprennent des machines à flux radial et des machines à flux axial. La Figure I.1 montre un diagramme schématique de deux types de machines magnétiques : à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). [42].

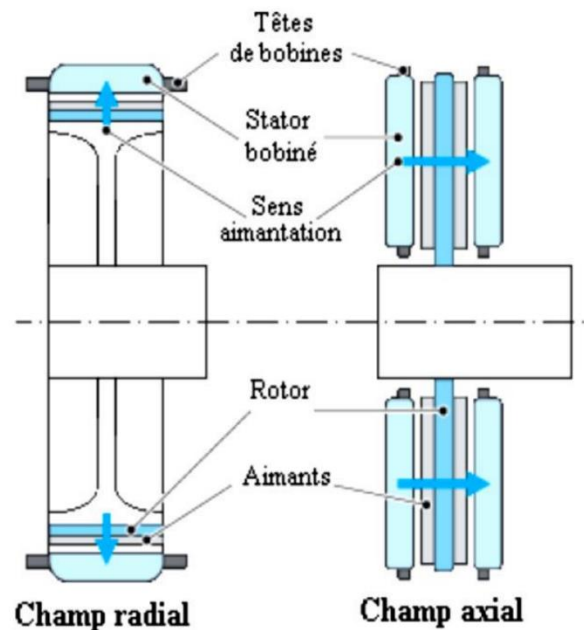


Figure I. 14: Vue schématique des machines à champ radial et axial.

I.5.2.3.a Structures à flux radial (RFPM)

Les rotors des machines synchrones peuvent être externes (Figure I.15.a) ou internes (Figure I.15.b). Dans la configuration à flux radial (RFPM), les machines à rotors internes sont des machines classiques. Elles sont faciles à réaliser et possèdent une bonne évacuation des pertes statoriques car le stator se trouve en périphérie. En effet, il y a généralement peu de pertes au rotor du fait de l'utilisation d'aimants permanents. Les machines à rotor externe sont couramment employées en moteur dans le domaine de la traction électrique où on les désigne par le terme de « moteurs roues » (Figure I.15) [43].

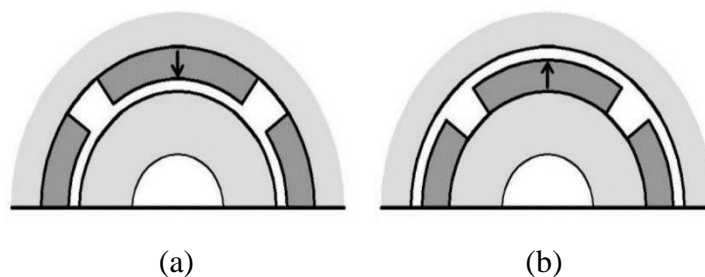


Figure I. 15: Topologies simplifiées du moteur MSAP : a) rotor externe, b) rotor interne.

I.5.2.3.b Structures à aimants déposés en surface

Cette structure est la plus facile à réaliser car les aimants permanents à aimantation radiale sont situés directement à la périphérie du rotor. Les aimants se présentent généralement sous la forme de briques et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine appartient au type de machine à pôle lisse. Les aimants sont soumis à la force centrifuge et peuvent se détacher du rotor. Des gaines non ferromagnétiques à haute conductivité électrique sont parfois utilisées. Protège les aimants permanents de la démagnétisation, de la réaction d'induit et de la force centrifuge. Ce cylindre peut également livrer un couple de démarrage asynchrone et jouer le rôle d'amortisseur [42].

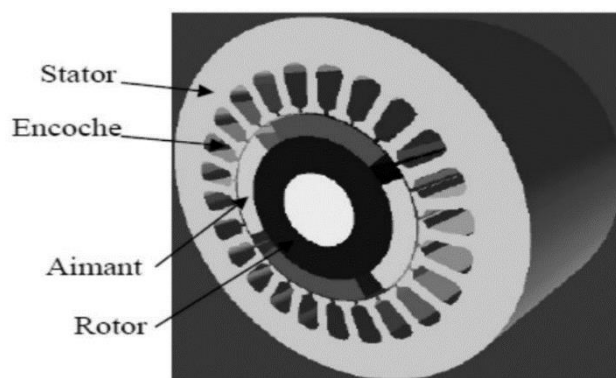


Figure I. 16: Structure à aimant déposer en surface (rotor interne).

I.5.2.3.c Structures à aimants encastrés

Les aimants encastrés (intégrés) sont montés également sur la surface du rotor lissent des espaces entre eux, ces espaces doivent être remplis et soudais par le fer. Le fer par laquelle a était soudais ces espaces crée une saillance et donne un couple réluctant en plus du couple des aimants [42] comme la montre la Figure I.17.

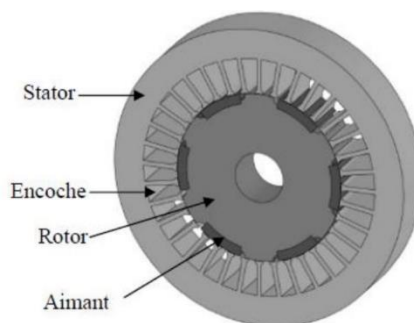


Figure I. 17: Structure à aimant encastrés.

I.5.2.3.c Structures à aimants enterrés

Une machine à aimant enterrer à des aimants intégrer dans le rotor utiliser dans les applications à grande vitesse ou l'aimantation est radiale (Figure I.18). Celle-ci a une surface du pôle magnétique plus petite que celle du rotor, et l'induction dans l'entrefer est plus faible que celle dans l'aimant. Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges [42].

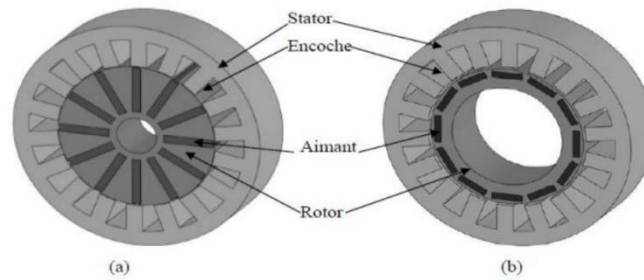


Figure I. 18: Structure à aimant enterrés : a) avec concentration de flux, b) structure classique.

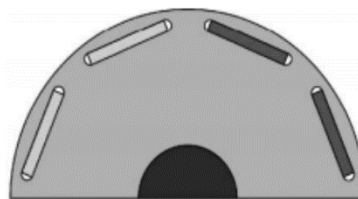


Figure I. 19: Rotor synchrone à aimant enterrée.

I.5.2.3.d Structures à flux axial (AFPM)

Les machines à structures de flux axial se compose d'une ou plusieurs plaques fixes ou mobiles qui maintiennent des aimants. Ces derniers représentent une différente solution possible pour l'entraînement direct à petite vitesse. Leur principal avantage est l'optimisation efficace de la zone de génération de couple. Malgré leur rendement leur montage est compliqué du fait des contraintes mécaniques liées à la poussée axiale.

Par rapport aux structures à écoulement radial, ces machines se caractérisent par des diamètres importants et des longueurs axiales relativement courtes. Le flux magnétique de l'aimant est axial et le courant est radial. Il existe différentes configurations pour le flux axial. La structure simple associant un rotor et un stator (Fig. I.20), et une structure à double entrefer avec un seul stator placé entre deux rotors (Fig. I.21 ou mono rotor). Entre deux stators Figure I.22 [44].

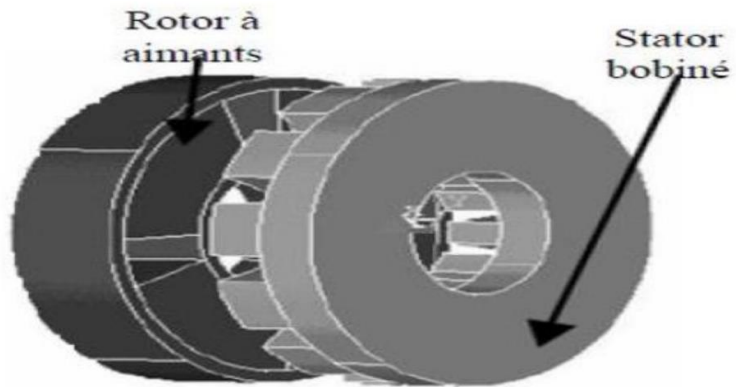


Figure I. 20: Structure axiale simple avec un rotor et un stator.

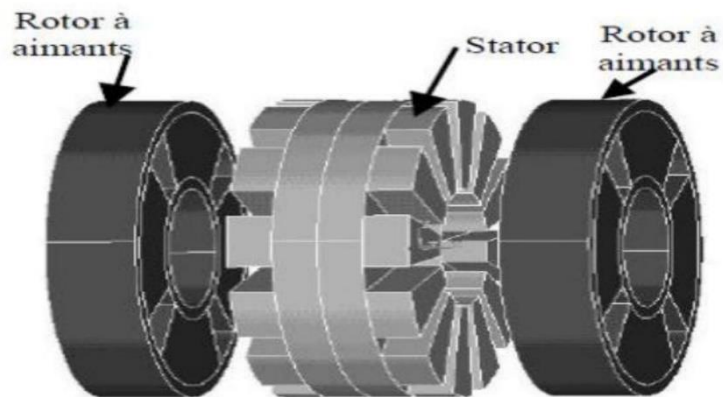


Figure I. 21: Structure à flux axial avec double rotor et un stator.

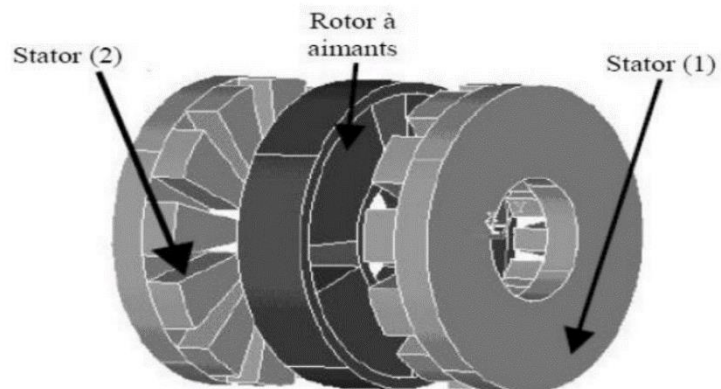


Figure I. 22: Structure à aimantation axial avec double stator et un rotor.

Aujourd'hui, l'intérêt dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne se porte sur l'utilisation de générateurs tournant à basse vitesse sans réducteurs. En effet, c'est la source de bruit et de pannes fréquentes. Cette machine sera adoptée pour le travail de cette thèse.

I.5.2.4 Principe de fonctionnement de la MSAP

Dans le MSAP il existe un enroulement statorique dont l'alimentation génère une force électromagnétique tournant avec une vitesse angulaire ω_s . Le rotor produit la force magnétique excitée par les aimants d'excitation, il a le même nombre de pôles que le stator, ce dernier est alimenté par un réseau triphasé. Ainsi, le stator crée un champ qui fait tourner le rotor. Plus le couple sur l'arbre est haut, plus l'angle de déviation des pôles est important. Le rotor est déconnecté du courant de rotation dès que cet angle dépasse 90° . La vitesse de synchronisation est égale à la vitesse de rotation du rotor. Elle est donc proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. La caractéristique de l'angle de couple électrique est illustrée à la Figure I.23 [44].

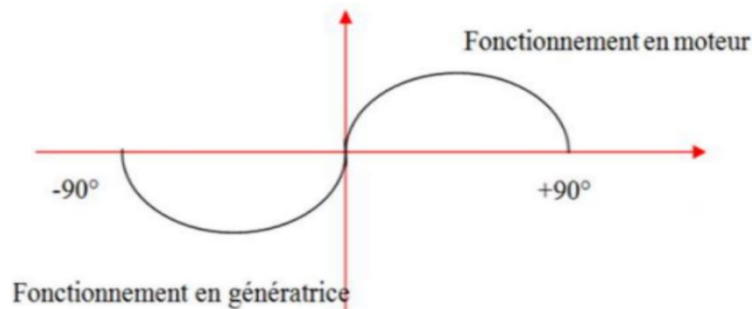


Figure I. 23: Caractéristique du couple-angle électrique.

I.5.2.4.a le principe de fonctionnement en mode génératrice (GSAP)

La source de toute l'énergie électrique est basée sur les générateurs à base des machines synchrones. Ces dernières sont les plus grands convertisseurs d'énergie au monde entraînées par certaines turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes. Ces machines convertissent la puissance mécanique en puissance électrique avec une capacité qui peut atteindre 1500 MW. Le champ du générateur synchrone à commande mécanique génère un champ de distribution spatialement variable dans les enroulements du stator. La force électromotrice (f-e-m) dans ces enroulements fait circuler un courant induit, créant un champ statorique dans le jeu qui tourne à la même vitesse que le champ induit.

I.5.2.4.b Principe de fonctionnement en mode moteur (MSAP)

Les moteurs synchrones à aimants permanents sont des moteurs à courant alternatif concurrent sérieux des moteurs asynchrones dans les utilisations des entraînements. Ces moteurs synchrones est devenu plus attractif et compétitif grâce au développement des aimants permanents et au développement réaliser dans le domaine de l'électronique de puissance [44].

I.6 L'énergie éolienne ses avantages et inconvénients

Les avantages d'énergie éolienne est lie aux développements de technique d'utilisation de ce type d'énergie, cette source d'énergie présente également des inconvénients. Il convient d'étudier ces inconvénients pour ne pas devenir un obstacle à son développement [45,46].

I.6.1 Avantages

- Son exploitation n'émit pas de CO₂ ;
- Une énergie renouvelable ;
- Pas de déchets radioactifs ;
- Arrêtés faciles ;
- Facilité de démonter ;
- Rentable dans endroits isolés ;
- Rendement élevé en hiver (la durée de l'année où la demande est la plus forte).

I.6.2 Inconvénients

- L'impact visuel ;
- Le bruit ;
- L'impact sur la migration des oiseaux ;
- La puissance électrique produite n'est pas constante ;
- Le coût élevé.

I.7 Conclusion

Différents types d'éoliennes ont été introduits dans la conception des systèmes de conversion d'énergie. Pour la mise en évidence de ce développement le chapitre reflète tout d'abord l'état de l'art expliquant les termes généraux liés à l'énergie éolienne et a présenté l'évolution de cette énergie à l'échelle mondiale puis à l'échelle algérienne. Par la suite, vient l'exposition des étapes de ce défi énergétique démontre par les différentes types d'éoliennes, éoliennes à vitesse fixe, éoliennes à vitesse variable, éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal. Enfin, ce premier chapitre explique le choix du type d'éolienne par laquelle l'étude est basée sur : la turbine à axe horizontal à vitesse variable couplée avec une génératrice

synchrone à aimants permanents. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la modélisation et le dimensionnement de la chaîne de conversion de l'éolienne.

Chapitre II :

*Modélisation et
dimensionnement de la
chaîne de conversion
éolienne à base de
GSAP*

II.1 Introduction

Une bonne connaissance de la modélisation dynamique du fonctionnement d'un moteur électrique facilite non seulement la tâche de l'étudier, mais surtout de prédire, par simulation, son comportement dans différents modes de fonctionnement.

Aujourd'hui, les moteurs synchrones à aimants permanents sont recommandés pour une utilisation dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne. Ce choix n'est pas aléatoire, il porte sur les nombreux avantages technologiques ou économiques que ce type de générateur offre par rapport aux autres types de générateurs. Évidemment, la configuration du GSAP prévoit un rotor sans bobinage et par défaut sans excitation. Cela signifie qu'il n'y a pas de balais et de contacts glissants nécessaires pour l'excitation, et donc une maintenance réduite et une plus grande durabilité de la machine. L'avantage le plus important du GSAP utilisé dans le secteur de l'énergie éolienne réside dans l'absence de boîte de vitesses pour certains types de générateurs extrêmement gros. Cette topologie de la machine permet une variation de vitesse dans les 100% de la vitesse de rotation nominale, et donc, de réduire la maintenance et le volume limité de l'éolienne [47].

Dans ce chapitre, nous établirons un modèle mathématique qui simule le fonctionnement d'une éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini. Le dispositif, ici étudié, est constitué d'une éolienne entraînant une génératrice sans multiplicateur de vitesse. La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation et le dimensionnement de l'éolienne et dans la deuxième partie nous aborderons une modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent et un onduleur MLI de tension.

II.2 Conversion de l'énergie éolienne

L'éolienne est une technologie qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique a une colonne d'air de longueur dx , de section S , de densité ρ , contrôlée par la vitesse v la figure II.1 s'écrit [48] :

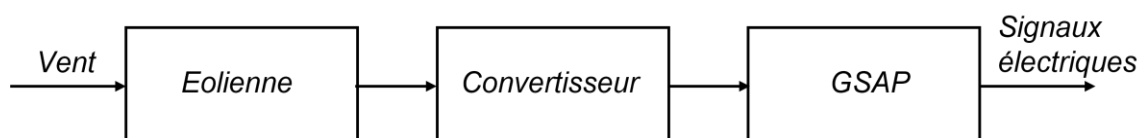


Figure II. 1: Structure du système de conversion de l'énergie éolienne.

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (\text{II.1})$$

ρ : masse volumique de l'air (en Kg/m³) ;

v : vitesse instantanée du vent (en m/s) ;

E_c : Energie en joules.

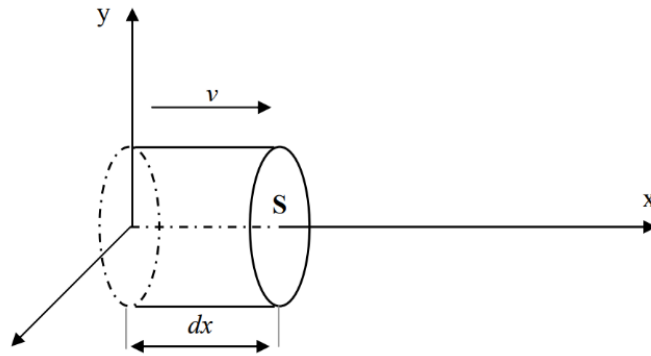


Figure II. 2: Colonne d'air se déplaçant à la vitesse v .

II.2.1 Loi de Betz

Cette loi spécifie que les éoliennes ne pourront jamais transformer l'énergie cinétique en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%). Cette loi est formulée par Albert Allemand Betz, en 1929 [49,50]. Le système dans la figure 2.3 présente un tube d'écoulement. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'éolienne et V_2 vitesse en aval.

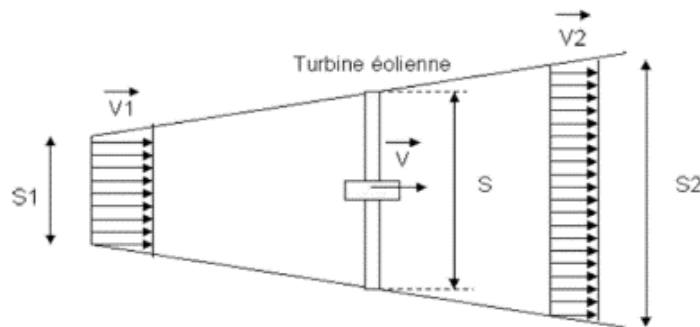


Figure II. 3: Tube d'écoulement autour d'une éolienne (théorie de Betz).

Le calcul de la masse d'air circulant dans le tube en une seconde est comptée par le produit de la densité de l'air, de la surface et de la vitesse moyenne. [51].

$$m_0 = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

La différence entre la puissance en amont et en aval donne la puissance réelle extraite par le rotor des pales

$$P_m = \frac{m_0(V_1^2-V_2^2)}{2} \quad (\text{II.3})$$

Remplaçant m_0 par son expression dans

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{2} \quad (\text{II.4})$$

On obtiendra la puissance totale théorique existante sur la surface S en mettant la vitesse du vent non réduite $V_2=0$ dans l'expression

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

II.2.2 (Tip speed ratio) vitesse spécifique

La relation de la vitesse linéaire au sommet des pales de turbine avec la vitesse instantanée du vent V est définie comme vitesse normalisée λ est donnée par l'équation suivante (figure II.4) [49,52] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II.6})$$

Où :

R_t : Rayon en m ;

V : Vitesse en m/s ;

Ω_t : Vitesse de rotation en rad/s.

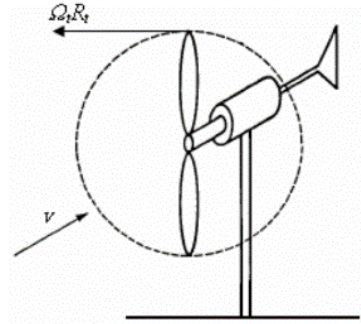


Figure II. 4: Vitesse tangentielle de l'aubage ($\Omega_1 R_1$) et vitesse de vent (V).

II.2.3 Production d'énergie mécanique

La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur est la combinaison des équations (II.2) et (II.4) (II.5) est formulé comme suit [50] :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot C_p \quad (\text{II.7})$$

C_p est le facteur de puissance ce dernier représente le rendement de l'éolienne.

Le rotor est généralement donné en fonction du rapport entre la vitesse de pointe de l'hélice (λ) et l'angle de décalage.

II.3 Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1 Hypothèses simple pour définir la turbine éolienne.

Le mécanisme pour lequel fonction la turbine est formée de trois pales directionnelles de longueur R . Ces pales sont fixées sur un arbre moteur qui tourne à la vitesse Ω turbine. la génératrice est commandé par le multiplicateur de facteur de gain G [52].

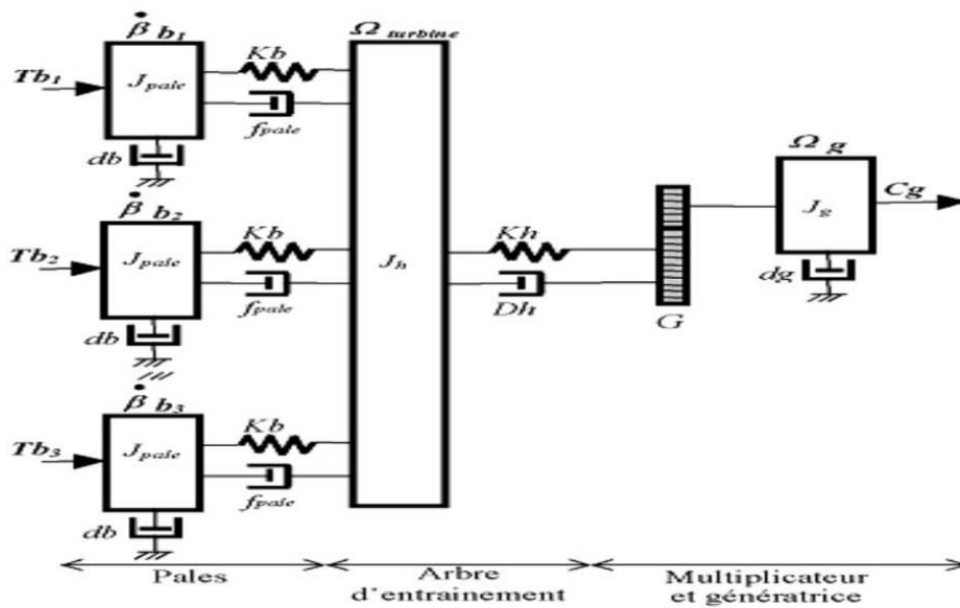


Figure II. 5: Système mécanique de l'éolienne.

Les trois pales sont identiques et disposées de la même manière :

- Inertie J_{pales} ;
- Élasticité K_b ;
- Coefficient de frottement par rapport à l'air d_b .

Ces pales sont réglables et ont toutes le même coefficient de friction. La notation des pales : leur vitesse ($\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$), leur force (Tb_1, Tb_2, Tb_3).

Les caractéristiques de l'arbre d'entraînement sont :

- Inertie J_h ;
- Élasticité K_h ;
- Facteur de frottement par rapport au multiplicateur D_h .

Les caractéristiques du rotor sont :

- L'inertie J_g ;
- Le facteur de frottement d_g .

Le rotor transforme le couple (C_g) au générateur et tourne à une vitesse exprimée en Ω_{mec} . Si l'on suppose que la vitesse du vent est uniformément répartie sur toutes les pales et donc que toutes les forces de poussée sont égales ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) ; l'ensemble des trois

pales est caractérisée par la somme de toutes les propriétés mécaniques qui peuvent être considérées comme un seul et même système mécanique.

D'autre part, en raison de la conception aérodynamique de la pale, le coefficient de frottement (δ) avec l'air est très faible et négligeable. La vitesse de la turbine est également très faible, de sorte que la perte par frottement est négligeable par rapport à la perte par frottement côté générateur. Ensuite, nous obtenons un modèle mécanique composé de deux masses sur la figure II.6. La valeur informative de ce modèle (par rapport à l'ensemble du modèle) a déjà été vérifiée.

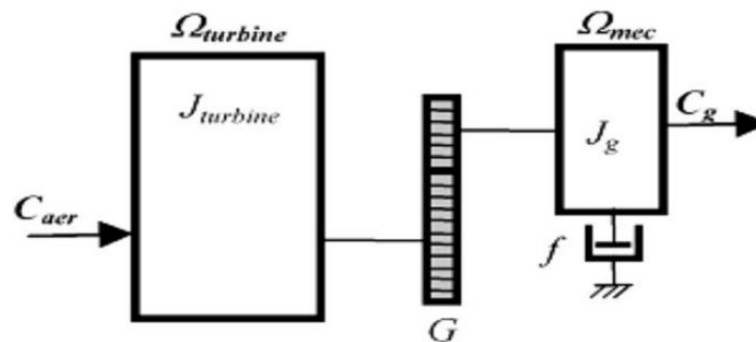


Figure II. 6: Modèle simplifié de la turbine.

II.3.2 Modèle de l'éolienne

L'entrée et la sortie de la turbine éolienne sont variables on peut les résumer par :

- L'énergie primaire admise par la turbine est déterminée par la vitesse du vent ;
- Les quantités spécifiques dont a besoin la machine, proviennent particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine ;
- L'inclinaison des pales, et de l'angle de calage déterminent la vitesse de la turbine ;
- La puissance ou le couple forment les quantités de sortie de la turbine qui sont contrôlées en variant les quantités d'entrée précédentes.

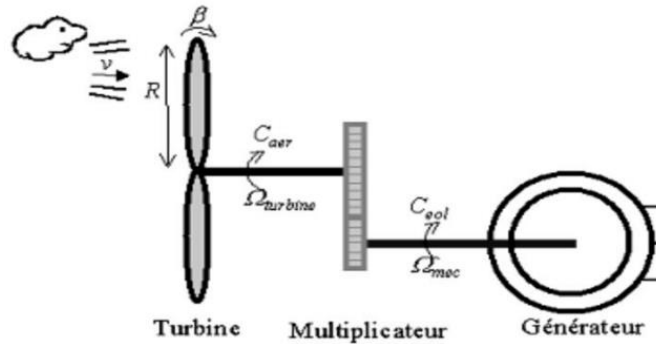


Figure II. 7: Schéma du système à modéliser.

La turbine capte l'énergie du vent transmise par ses pales et la convertit en énergie mécanique. Si l'éolienne est face au vent, la puissance mécanique peut être exprimée comme [53] :

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 C_p \quad (\text{II.8})$$

ρ : la masse volumique de l'air (Kg.m-3). Spécifié de chaque région, la masse volumique de l'air dépend de l'altitude et de la température où est installée l'éolienne. Nous avons pour notre part fixé ρ à 1.225 (kg.m-3);

V_v : la vitesse du vent(m/s) ;

C_p : le coefficient de la puissance ;

S : la surface traversée par le vent exprimée par $S=\pi R^2$;

Avec : R le rayon de la voilure(m) ;

II.2.3 Le coefficient de puissance (C_p)

Le coefficient de puissance relie la force du vent à la vitesse du vent. En général on obtient le coefficient C_p à partir des résultats pratiques. Dans des cas réels, l'éolienne aura toujours un coefficient de puissance plus petit que le facteur de Betz à cause des pertes aérodynamiques qui dépendent de la conception du rotor (nombre de pales, poids, rigidité, etc....).

Le coefficient de puissance est lié à la qualité de l'éolienne et dépend de la forme des pales. On peut modéliser le coefficient de puissance par une seule équation qui dépend du ratio de vitesse (λ) et l'angle d'orientation des pales (β). Le coefficient de puissance est obtenu par des zones d'information ou en rapprochant le coefficient en utilisant la fonction analytique.

Dans notre cas, la fonction analytique du coefficient de puissance employée pour modéliser la turbine est donnée comme suit

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-C_5 \frac{1}{\lambda}} \quad (\text{II.9})$$

Les coefficients $C_1 - C_5$ peuvent être différents pour diverses turbines.

Les six coefficients (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) sont modifiés pour avoir un C_p maximal.

Le coefficient C_p est variable et est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t et des paramètres des aubes de turbine tels que l'angle d'incidence et l'angle de calage [54,55]

Une étude expérimentale pour dériver la valeur du coefficient C_p :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} \quad (\text{II.10})$$

Dont :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.11})$$

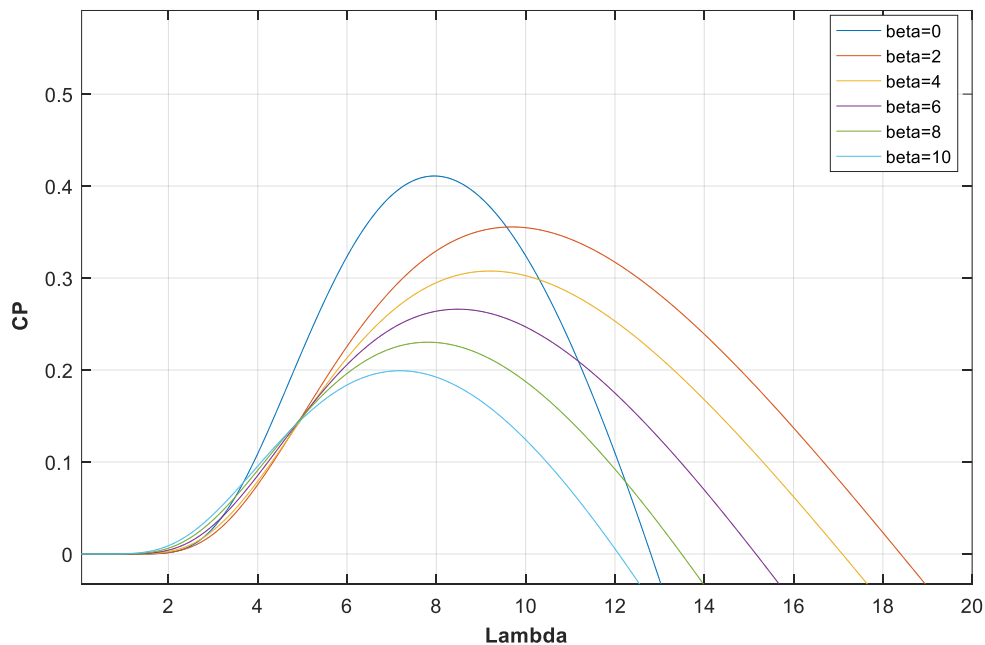


Figure II. 8: *Cp-λ caractéristiques pour différentes valeurs de β.*

La figure II.8 présente le coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes valeurs de β (angle de calage), afin d'atteindre une vitesse optimale, la vitesse

du générateur doit varier en fonction de la vitesse du vent. Notons que pour une valeur constante de λ , le coefficient C_p varie avec la valeur de β . Les valeurs plus petites ont des coefficients plus grands (par exemple pour $\beta=0$, $\lambda_{\text{Optimal}}=8$, $C_p=0.41$).

II.3.4 Modélisation de vitesse du vent

Le modèle d'éolienne nécessite un modèle de vent, de comportement aérodynamique des hélices, générateurs, convertisseurs de puissance et système de commande. La variable d'entrée du système éolien provient du vent. La hauteur exacte du centre est assez compliquée pour être mesurer. Cependant, une quantité aléatoire du vent est déterminée par des paramètres statistiques. La fonction scalaire qui croît avec le temps exprime généralement vitesse du vent [25].

$$V_v = f(t) \tag{II.12}$$

La précision de l'amélioration de la vitesse du vent en fonction du temps apparait par une fonction analytique ou générée par une loi statistique mesuré pour un lieu examiné. Pour un modèle théorique, la configuration du vent doit satisfaire deux normes :

- La durée du profil doit être limitée pour réduire le temps de simulation.
- Le profil de vent doit représenter les caractéristiques du sédiment (intensité, variation, distribution statistique, etc.).

Cette étude, représente l'évolution de la vitesse du vent de manière déterministe, par la somme de plusieurs harmoniques, cohérente avec [56] :

$$Vv(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \tag{II.13}$$

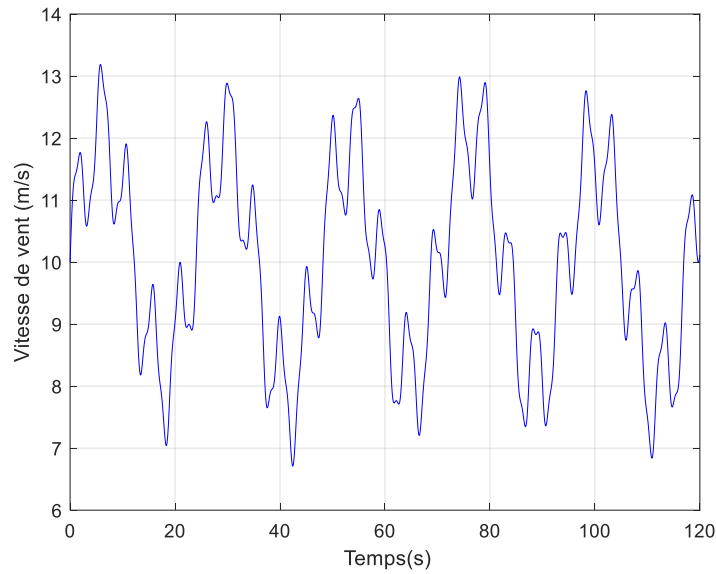


Figure II. 9: La vitesse du vent.

II.3.5 Modélisation de l’arbre mécanique

Par l’équation de base de la dynamique on détermine la variation de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total T_m agissant sur le rotor de l’éolienne :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J_t} T_e + \frac{D_G}{J_t} \Omega_t - \frac{1}{J_t} T_m \tag{II.14}$$

Pendant le fonctionnement du générateur, le couple électromagnétique T_e est de signe négatif. Le schéma bloc dans la figure II.10 ci-dessous montre le modèle de l’arbre de l’éolienne associé au modèle du générateur [40]:

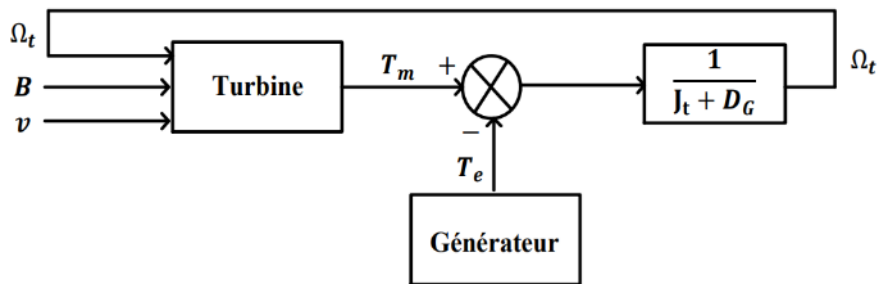


Figure II. 10: Modèle de l’arbre de l’éolienne.

II.3.6 Dimensionnement de la turbine

L’aérogénérateur est caractérisé par sa courbe de puissance P_v [57,58] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \tag{II.15}$$

Le dimensionnement est réalisé par une approche statistique, le choix du type devra être compatible avec un cahier de charge spécifique :

Tableau II. 3: Cahier de charge.

Une éolienne de 3Kw.
Site : Adrar.
La vitesse moyenne 10(m/s).
Le coefficient de puissance $C_p=0.4$ et $\lambda=8$.
Un rendement $\eta=97\%$.
La masse volumique d'air $\rho=1.225$.

D'après l'équation de la puissance aérodynamique

$$P_{aer} = P_v \cdot C_p \quad (\text{II.16})$$

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot C_p \quad (\text{II.17})$$

Donc

$$S = \frac{2P_{aer}}{\rho \cdot C_p \cdot V_v^3} \quad (\text{II.18})$$

Et

$$S = \pi R^2 \quad (\text{II.19})$$

Donc

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (\text{II.20})$$

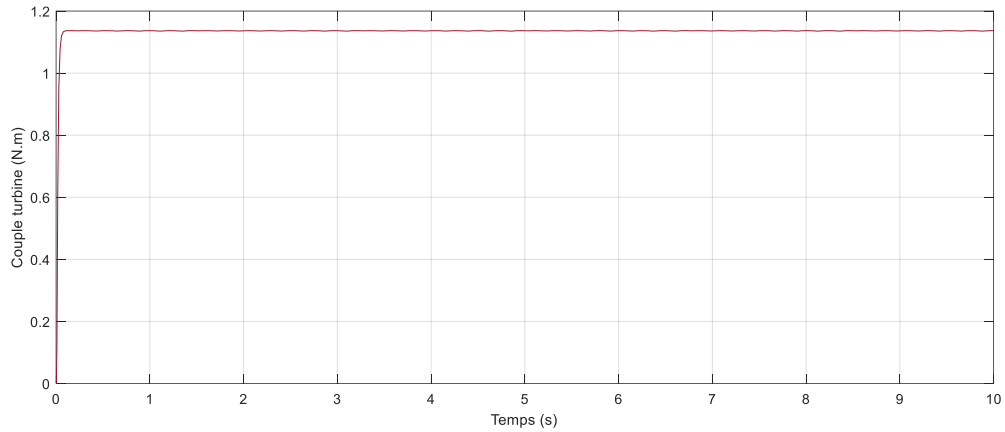
Pratiquement C_p est compris entre 0.39 et 0.41 alors pour un $C_p=0.4$, On trouve les valeurs de notre turbine :

$$S=12.62 \text{ m}^2.$$

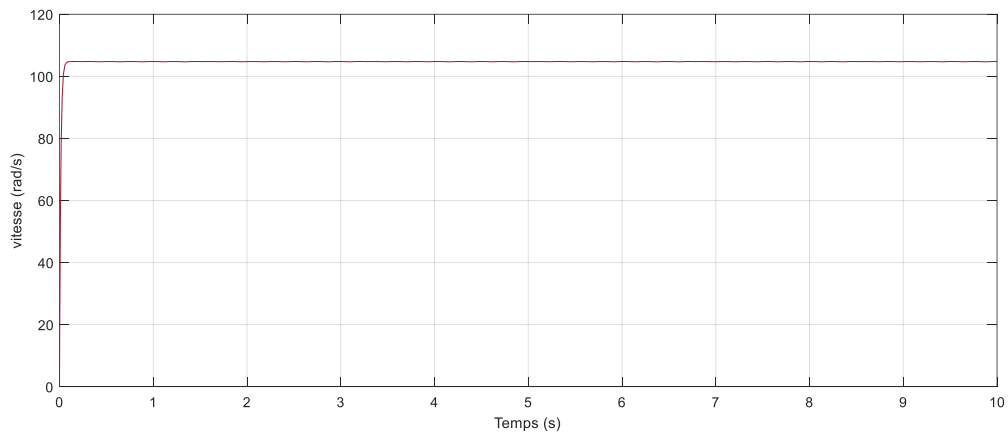
$$R=2\text{m}.$$

II.3.7 Résultat de simulation de la turbine

En utilisant les paramètres de la turbine dimensionnée, et on applique deux profile de vent sur la turbine, une vitesse de vent fixe de (10 m/s) et une variable simulée par l'équation (II.11) appliquerons un couple de 15 (N.m).

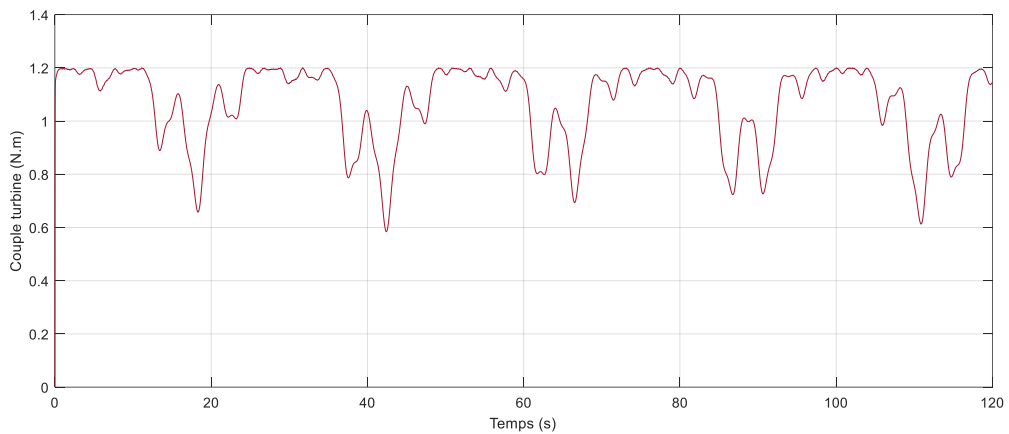


(a) Couple de la turbine.

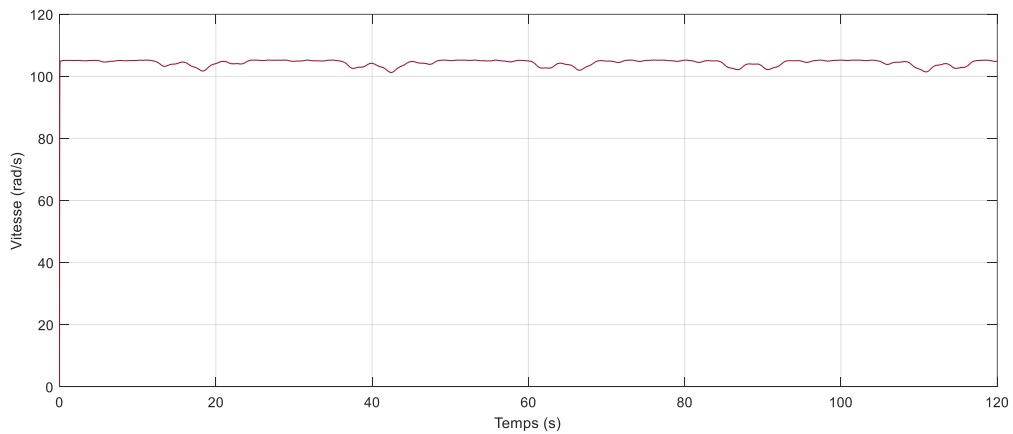


(b) Vitesse mécanique.

Figure II. 11: Simulation de la turbine cas d'une vitesse fixe.



(a) Couple électromagnétique.



(b) Vitesse mécanique

Figure II. 12: Simulation de la turbine cas d'une vitesse variable.

Les résultats de simulation de la turbine dévoilent un bon ajustement quant aux variations de la vitesse du vent.

II.4 Modélisation de la génératrice synchrones à Aimants Permanents

Pendant les entrainements à vitesse variables une certaine gamme de puissance est obligatoire. Cette même gamme de puissance est requise dans certaines applications industrielles. Les machines synchrones à aimants permanents s'imposent pour donner cette gamme de puissance grâce à de nombreux avantages (Pas d'excitation au niveau du rotor et donc pas de pertes rotoriques, meilleur rendement et couple massique élevé). La gamme de puissance est aussi utilisées pour améliorer la fiabilité du système d'entraînement des générateurs éoliens, en réduisant le nombre de pièce en rotation. Il est nécessaire de donner son modèle mathématique en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices afin d'obtenir

le modèle le plus simple que possible de la génératrice dans la chaîne de production d'énergie éolienne.

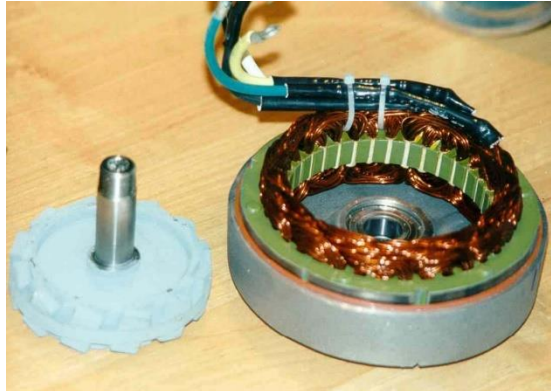


Figure II. 13: Exemple d'un générateur synchrone à aimants permanents de petite éolienne.

Une machine synchrone est constituée de la partie mobile, le rotor. Une partie fixe appelée stator. Le rotor est constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants.

Le rotor est entraîné en rotation par une force externe pour produire de l'électricité. Son champ magnétique induit des courants dans les bobines du stator lors de sa rotation. La vitesse de ce champ tournant est appelée "vitesse synchrone".

Si le rotor n'est pas entraîné en rotation par une force externe, le rotor tournera tout seul. Son champ magnétique s'aligne sur chacune des trois bobines du stator. De décalage en décalage, cela fait tourner le rotor. La vitesse est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation [59].

Un modèle mathématique d'une machine synchrone est développé sur la base de certaines hypothèses simplificatrices importantes [61] :

- Le circuit magnétique de la machine est non saturé ;
- La répartition sinusoïdale de la F.E.M ;
- L'effet de la température sur les résistances est négligé ;
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme ;
- L'effet d'encoche est négligeable.

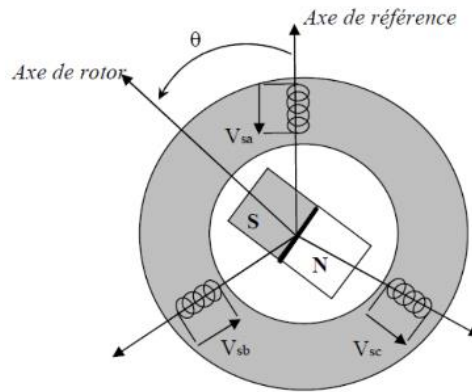


Figure II. 14: Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent.

II.4.1 Mise en équation de GSAP

Les modèles de machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformée de Park, qui relie les équations électriques du stator et du rotor au système cartésien d'axes d et q.

Le modèle de la GSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante [60,62] :

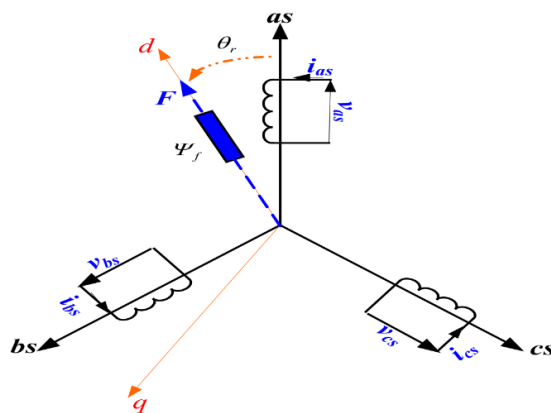


Figure II. 15: GSAP à modéliser.

II.4.2 Equations électriques

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$[V_a \ V_b \ V_c] T$: Vecteur tension de phases statoriques ;

$[i_a \ i_b \ i_c] T$: Vecteur courant de phases statoriques ;

$[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c] T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : La résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques d'une machine synchrone sont considérés comme connectés en étoile avec un neutre isolé. Dans ce cas, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, le courant homopolaire est inexistant. Par conséquent, la présence de composantes homopolaires, de tension ou de flux n'interfère pas avec le calcul du couple. Le comportement de la machine peut être déterminé par deux variables indépendantes [54,62].

II.4.3 Passage au repère de Park

Des modifications de repère sont nécessaires pour simplifier le modèle dynamique de la machine. Cette transformation mathématique permet de remplacer les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ par deux bobines virtuelles équivalentes situées sur le rotor et déphasées de $\pi/2$.

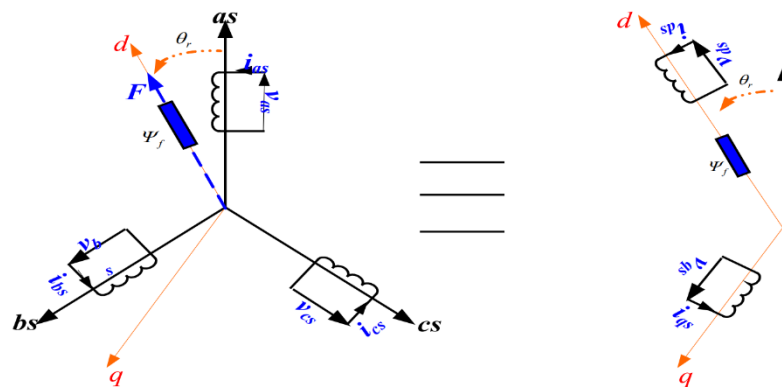


Figure II. 16: Représentation de la MSAP dans le repère (d,q) de Park.

La transformation de Park est définie par la matrice suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Lors du passage du repère (d,q) au repère (a,b,c), les équations sont obtenues par la transformation de Park inverse :

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

II.4.4 Modèle de la GSAP dans le repère de Park

➤ Equations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \\ v_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

➤ Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \Psi_f \\ \Psi_{qs} = L_q \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

L_d et L_q : les inductances directes et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ .

Ψ_f : le flux inducteur.

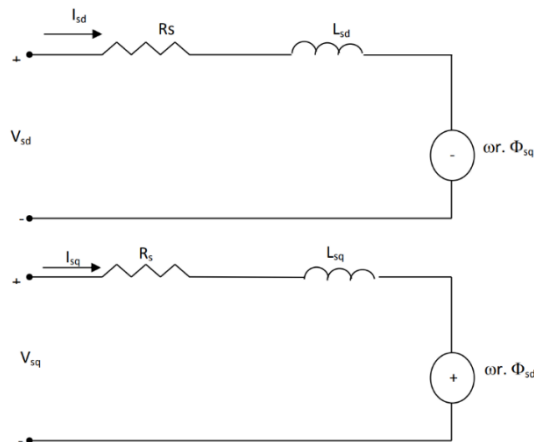


Figure II. 17: circuit équivalent de la génératrice synchrone à aimants suivant les axes (d, q) dans un référentiel lié au rotor.

Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[(L_d - L_q)]i_q i_d + i_q \Psi_f \quad (\text{II.26})$$

Où :

- P : nombre de paires de pôles ;
- i_d : courant statorique selon l'axe d ;
- i_q : courant statorique selon l'axe q ;
- L_d : inductance statorique selon l'axe d ;
- L_q : inductance statorique selon l'axe q ;
- Ψ_f : flux inducteur

Equations mécaniques

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante [63]:

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.27})$$

Où :

- C_m : couple moteur appliqué sur la génératrice ;
- Ω : couple de frottement ;
- J : moment d'inertie total de la machine ;
- f : coefficient de frottement visqueux.

II.5 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur de tension est un convertisseur qui établit une liaison entre une source de tension continue et une charge alternative. Il est composé de trois branches indépendantes composées chacune de deux interrupteurs.

Pour faire la modélisation de l'onduleur de tension, nous considérons sa source d'alimentation comme parfaite, qui serait constituée de deux générateurs fem par $UDC/2$ connectés par un seul point de masse de l'onduleur.

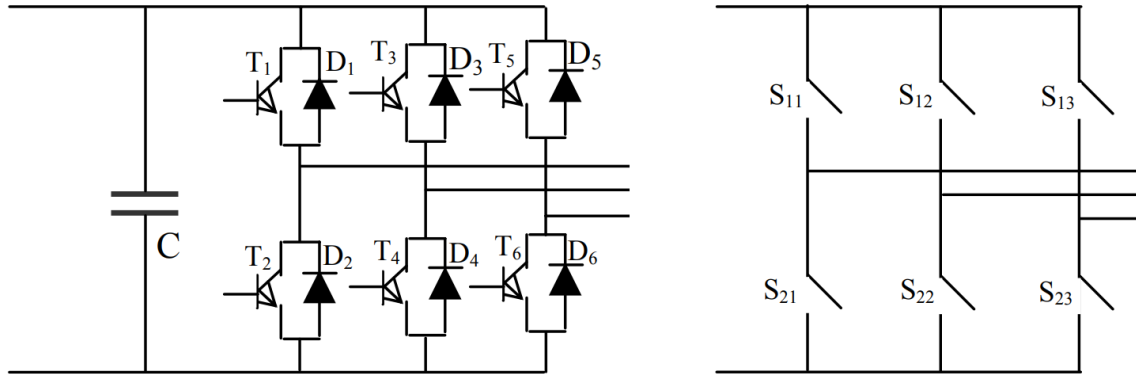


Figure II. 18: Schéma de l'onduleur et son modèle.

Pour simplifier l'étude, supposons que [64,65] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Supposons que six commutateurs électroniques (peut-être des transistors (bipolaires, MOSFET, IGBT)) soient entièrement présentés et combinés avec des diodes tête-bêche ou des thyristors avec des circuits de blocage d'amorçage externes. Les commandes des interrupteurs d'une même branche doivent se compléter pour éviter de court-circuiter la source de tension continue. Lorsque l'interrupteur est ouvert et fermé, une tension alternative est générée à partir de la rangée de fentes rectangulaires, et le temps de fonctionnement est déterminé par l'actionnement de l'interrupteur.

La machine est modélisée à partir des tensions simples que nous enregistrons comme V_{ra} , V_{rb} et V_{rc} . L'équation de tension simple appliquée aux trois phases est :

$$\begin{cases} v_{ra} = v_{AO} + v_{ON} \\ v_{rb} = v_{BO} + v_{ON} \\ v_{rc} = v_{CO} + v_{ON} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Par addition on a :

$$v_{ra} + v_{rb} + v_{rc} = v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} + 3v_{ON} \quad (\text{II.29})$$

Sachant que le système des tensions triphasées est symétrique, donc :

$$v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} + 3v_{ON} = 0 \quad (\text{II.30})$$

D'où :

$$v_{ON} = -\frac{1}{3}(v_{AO} + v_{BO} + v_{CO}) \quad (\text{II.31})$$

On remplace (II.28) dans (II.31), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} v_{ra} = \frac{2}{3}v_{AO} - \frac{2}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{CO} \\ v_{rb} = -\frac{1}{3}v_{AO} + \frac{2}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{CO} \\ v_{rc} = -\frac{1}{3}v_{AO} - \frac{1}{3}v_{BO} + \frac{2}{3}v_{CO} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

On peut écrire le système (II.32) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$\begin{cases} v_{AO} = \frac{U_{dc}}{2} S_a \\ v_{BO} = \frac{U_{dc}}{2} S_b \\ v_{CO} = \frac{U_{dc}}{2} S_c \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Tel que :

$$S_a = 1 \text{ si } k_1 \text{ fermé si non } S_a = -1 ;$$

$$S_b = 1 \text{ si } k_2 \text{ fermé si non } S_b = -1 ;$$

$$S_c = 1 \text{ si } k_3 \text{ fermé si non } S_c = -1 ;$$

On remplace (II.33) dans (II.34), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Le tableau ci-dessous présente les expressions prenant la tension simple et composée, selon l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur k_1, k_2, k_3 (les états de k_4, k_5, k_6 sont respectivement complémentaires pour k_1, k_2, k_3).

Tableau II. 4: Etablissement des expressions des tensions simples et composées.

K_1	K_2	K_3	V_{AO}	V_{BO}	V_{CO}	V_{ra}	V_{rb}	V_{rc}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
F	F	F	$V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	0	0	0	0	0	0
F	0	F	$V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	V_{DC}	$-V_{DC}$	0
F	F	0	$V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	0	V_{DC}	$-V_{DC}$
F	0	0	$V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	V_{DC}	0	$-V_{DC}$
0	F	F	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}$	0	V_{DC}
0	0	F	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	0	$-V_{DC}$	V_{DC}
0	F	0	$-V_{DC}/2$	$V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}$	V_{DC}	0
0	0	0	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	0	0	0	0	0	0

II.5.1 Stratégie de commande des onduleurs par MLI sinus-triangle

Dans le cadre d'applications industrielles, plusieurs stratégies de contrôle statique et transitoire sont possibles pour le contrôle par convertisseur de la tension d'alimentation des machines. En régulation en régime permanent, les principales conditions d'optimisation électrique sont le rejet d'harmoniques pour éviter l'ondulation mécanique du couple et minimiser les pertes dans le circuit du convertisseur. Et pour les commandes transitoires, les critères d'autogestion sont la vitesse et le temps de réponse.

Cependant. Il est généralement dur de répondre pleinement et simultanément à ces deux types de critères. L'objectif du MLI est de minimiser les variations de vitesse, de couple et de courant. Cela réduit la charge harmonique sur le réseau électrique et minimise les pertes dans le système, améliorant ainsi l'efficacité.

Le contrôle MLI consiste à diviser la tension ou le courant de sortie en plusieurs impulsions de différentes largeurs en agissant sur les commutateurs de l'onduleur. Ces commutateurs sont définis par l'intersection de deux signaux :

La première est une onde de référence ou modulée représentant la tension de sortie souhaitée de fréquence f , et la seconde est un signal haute fréquence du signal de référence représentant la commutation de l'onde modulée (porteuse). La vitesse du commutateur statique à partir de la coïncidence entre la référence (tension sinusoïdale V_{ref}) et la porteuse (signal haute fréquence triangulaire) détermine le cas de commutation de la sortie MLI. L'impulsion de sortie est 1 lorsque le signal de référence est supérieur au signal porteur. En dessous de la porteuse, l'impulsion de sortie est -1.

II.6 Résultat de simulation

Le schéma bloc global du système étudié sous Matlab/Simulink est démontré dans la figure 2.30. La turbine éolienne couplé directement avec la machine synchrone à aimant permanent (GSAP) Les paramètres nominaux de la génératrice utilisée dans la chaîne de conversion sont indiqués dans l'annexe (A) ; la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé par MLI connecté directement au réseau électrique triphasé (398/690 V/ 50 Hz).

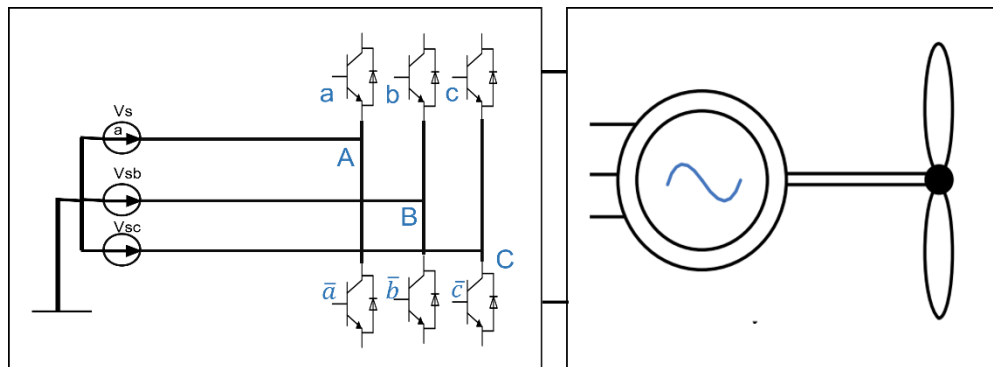


Figure II. 19: La chaîne de conversion.

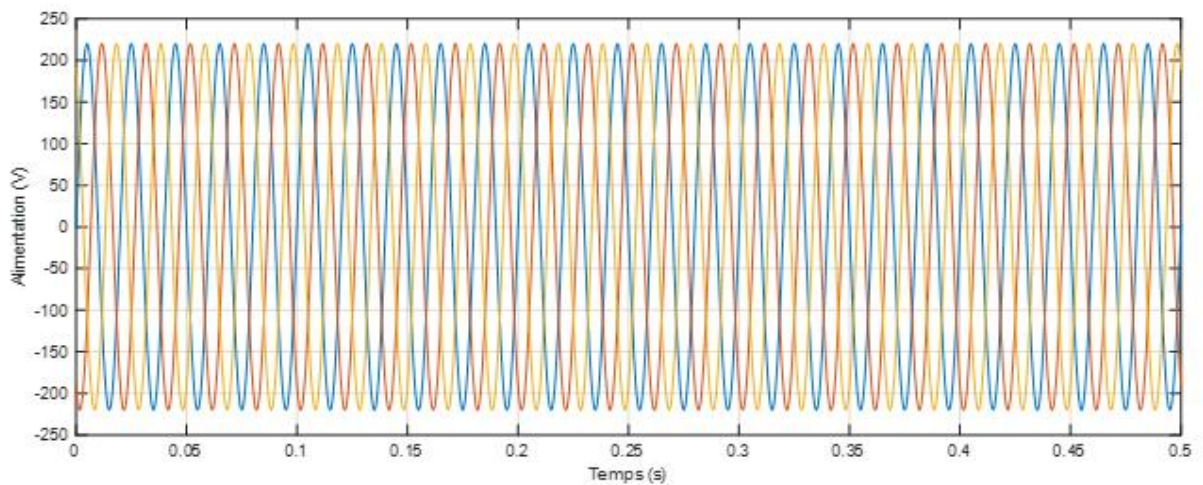


Figure II. 20: Alimentation triphasé.

Nous avons testé le model complet de système dans Matlab/Simulink sous une vitesse de vent fixe puis une vitesse variable.

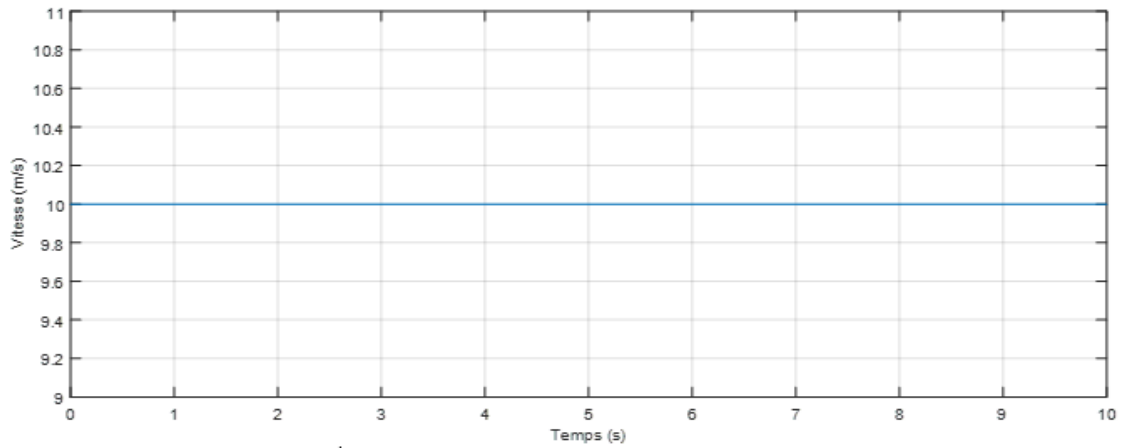


Figure II. 21: La vitesse de vent fixe.

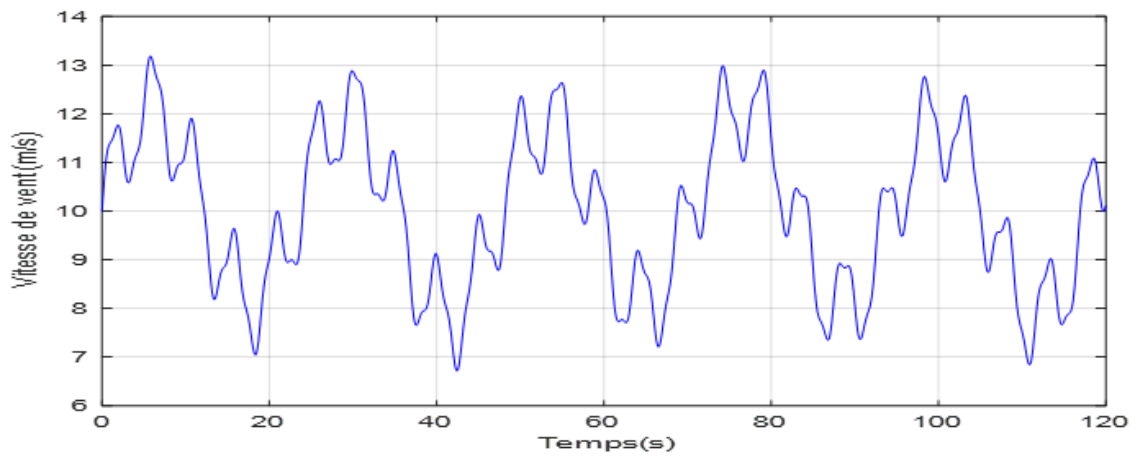


Figure II. 22: La vitesse de vent variable.

II.6.1 Résultat de simulation de l'onduleur de tension MLI

La Figure II.23 montre les résultats de simulation numérique de l'onduleur commandé par la méthode MLI sinusoidale triangulaire.

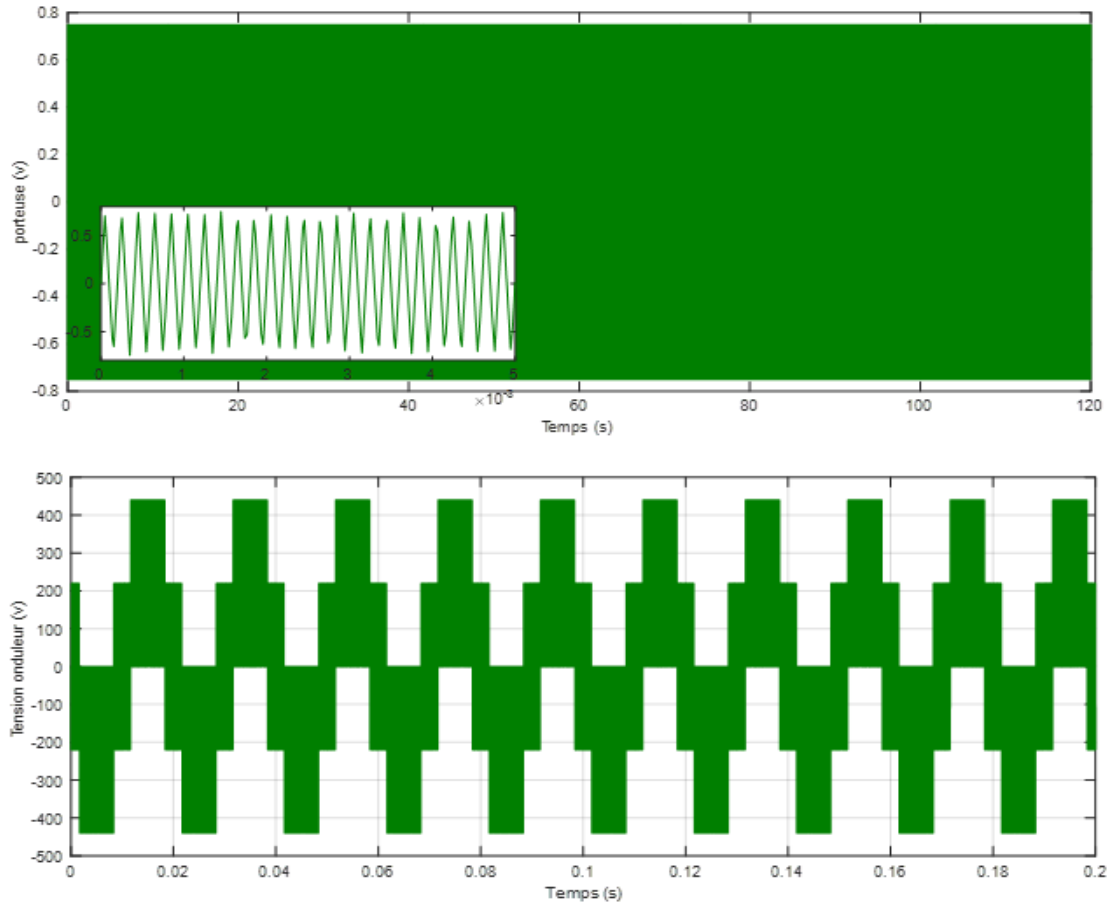
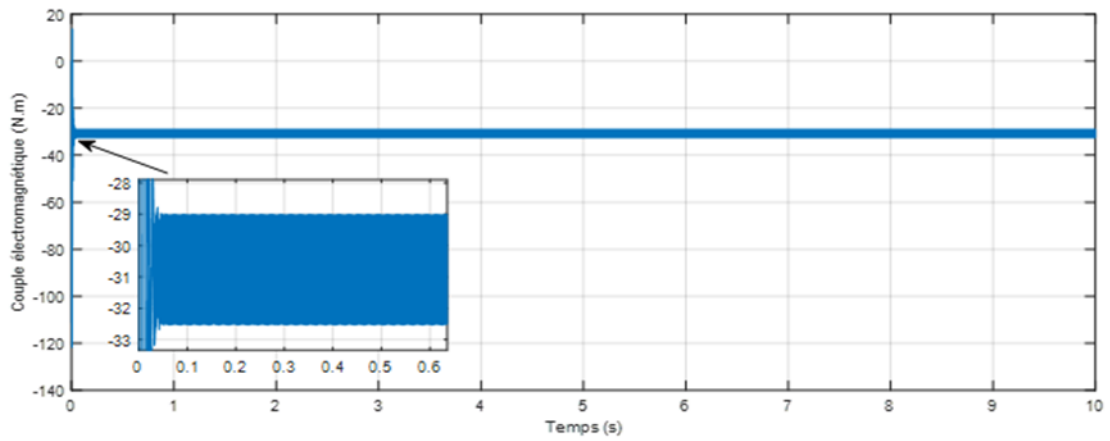
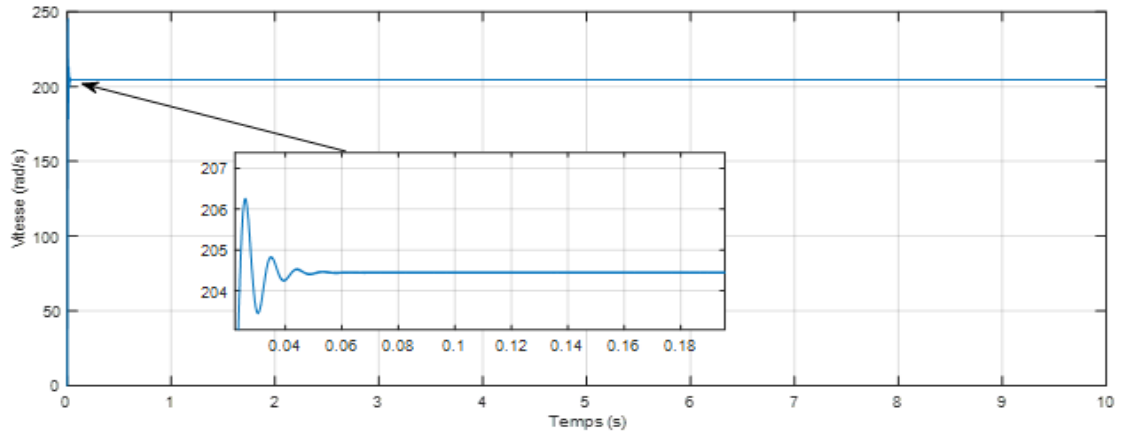


Figure II. 23: La tension de l'onduleur.

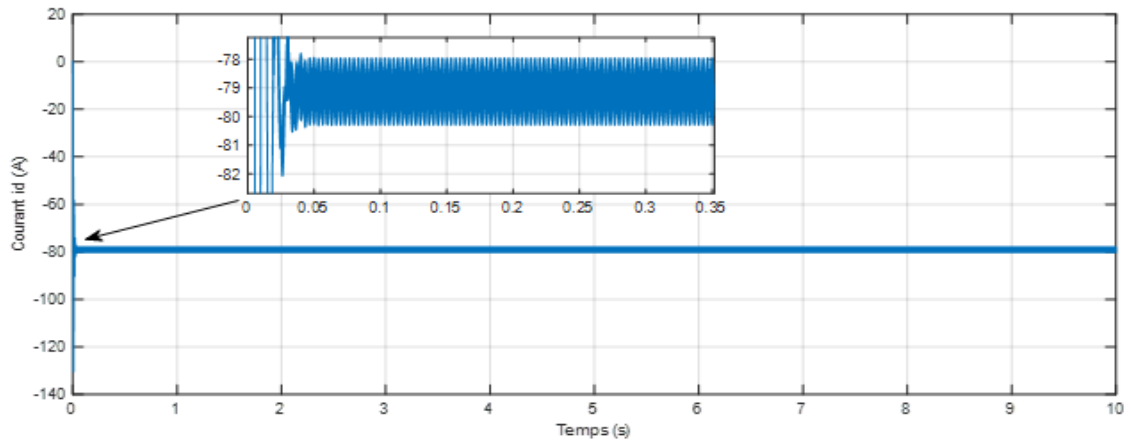
-Résultats de simulation de la chaîne éolienne avec une vitesse du vent 10m/s



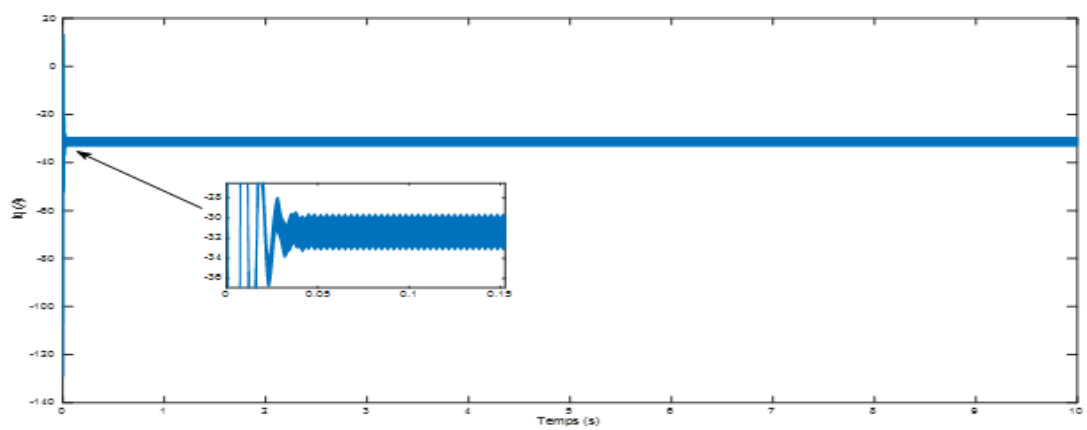
(a) Couple électromagnétique.



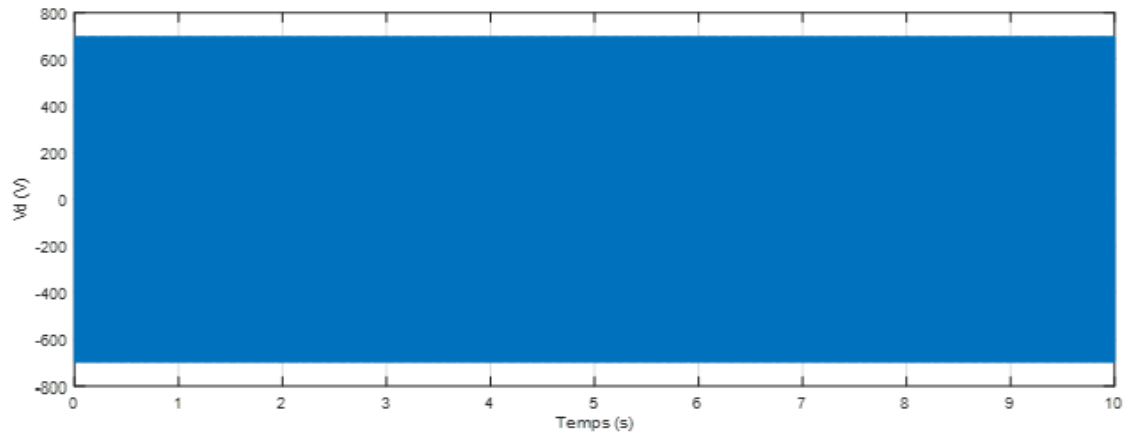
(b) Vitesse mécanique.



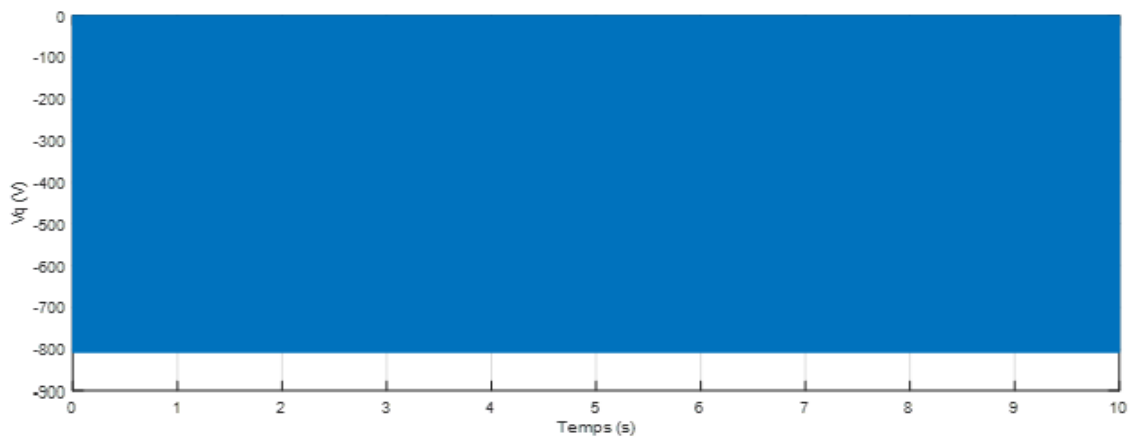
(c) Courant I_d .



(d) Courant I_q .



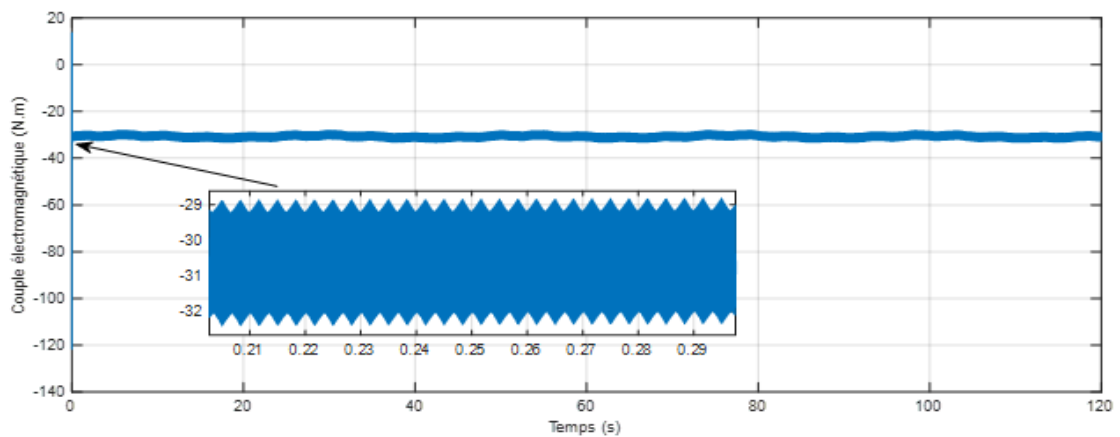
(e) Tension V_d .



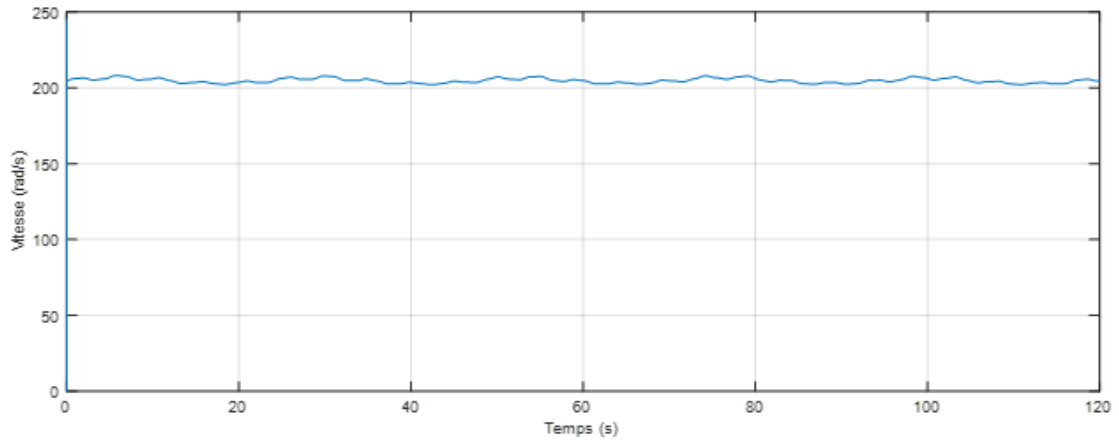
(f) Tension V_q .

Figure II. 24: Résultat de la chaîne cas d'une vitesse fixe.

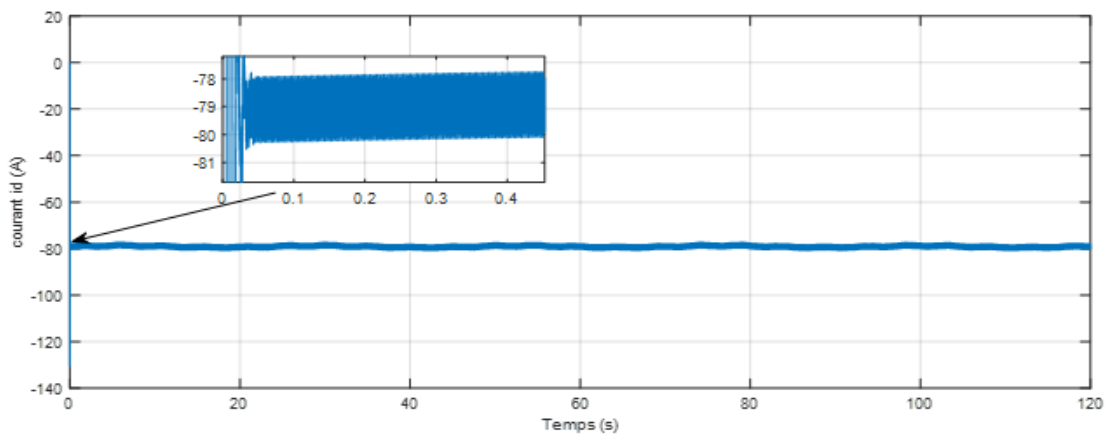
-Résultats de simulation de la chaîne éolienne avec une vitesse du vent variable.



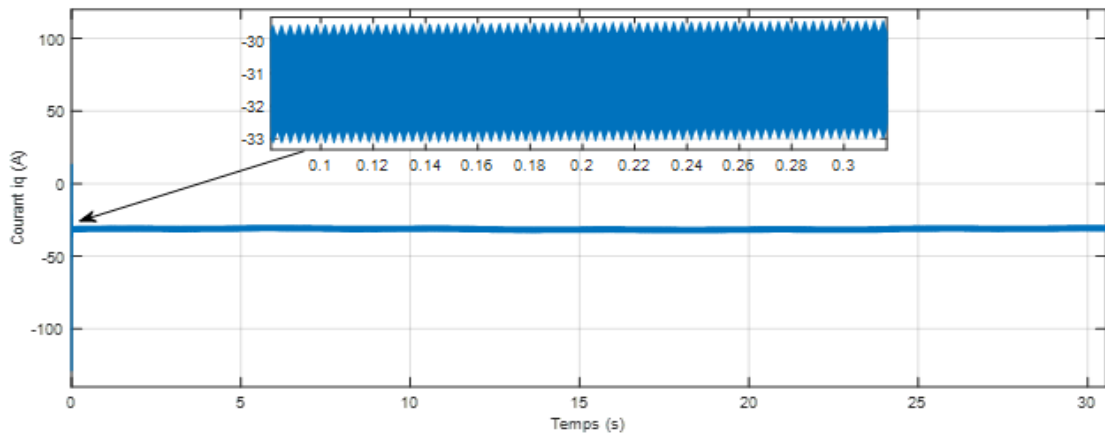
(a) Couple électromagnétique.



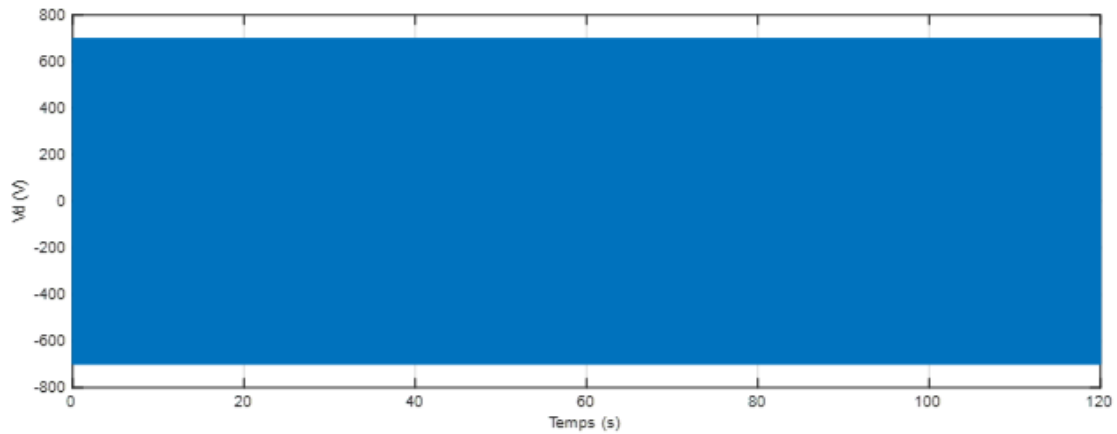
(b) Vitesse mécanique.



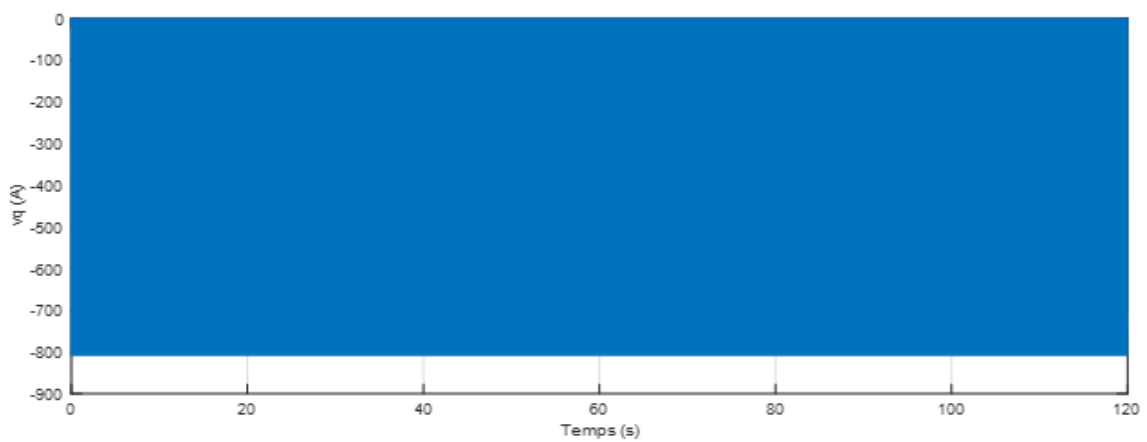
(c) Courant I_d .



(d) Courant I_q .



(e) Tension V_d .



(f) Tension V_q .

Figure II. 25: Résultat de la chaîne cas d'une vitesse variable.

La Figure II.25 montre les résultats de simulation d'un générateur GSAP directement couplé à une éolienne avec une vitesse fixe de 10 m/s et la Figure II.26 montre les résultats de simulation d'un générateur GSAP couplé directement à une éolienne avec une vitesse de changement de vitesse du vent. Les résultats de simulation obtenus montrent clairement la réponse dynamique rapide des résultats. Ces résultats montrent que la variation de la vitesse mécanique, du couple électromagnétique, de la tension et du courant est cohérente avec la variation de la vitesse du vent. Ils atteignent une valeur de vitesse du vent légèrement inférieure ou supérieure en raison de la suppression du multiplicateur. Les oscillations sont exprimées en différentes valeurs dues à la technique MLI due à la commutation des commutateurs de l'onduleur.

Pour régler ce problème la commande non-linéaire (Mode glissant-SMC) est traitée dans le chapitre suivant.

II.7 Conclusion

La modélisation est un paramètre nécessaire pour effectuer les simulations. Dans ce chapitre on a donné les diverses notions mathématiques ainsi que la manière de développer les équations en relation avec la génératrice à étudier. Nous avons décrit ce qui se passe dans une chaîne de conversion éolienne.

Tout d'abord on a modélisé et dimensionner la turbine éolienne utiliser dans ce travaille, ensuite, sur la base d'un assemblage d'hypothèses simplifiées, le modèle GSAP dans le cadre de Parks a été établi pour linéariser le système et faciliter l'étude. Ensuite nous abordons le modèle du convertisseur statique incluant l'onduleur MLI. Enfin, nous terminons cette section, par Différents résultats de simulation présentés qui montre le problème de fluctuation qui sera arranger dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

*Commande à structure
variable du système de
conversion d'énergie
éolien*

III.1 Introduction

Pour les systèmes non linéaires ou les systèmes à paramètres non constants, les lois de commande classiques peuvent ne pas suffire car elles ne sont pas robustes, surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. Nous devons faire utiliser des commandes insensibles aux variations, perturbations et non-linéarités du paramètre. Pour cela nous utilisons la commande par mode glissant. Il s'agit d'un cas particulier de contrôle à structure variable (CSV), et c'est bien connu pour sa robustesse, sa stabilité, sa simplicité, et son temps de réponse très faible associé à son insensibilité aux changements de paramètres internes et externes.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques concepts de base de la commande du mode de glissement et du choix de surface. Appliquez ensuite cette stratégie de contrôle sur la GSAP.

III.2 Système à structure variable

Un système à structure variable (SSV) est un système dont la structure change pendant le fonctionnement. Il se caractérise par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet de basculer entre les structures individuelles à tout moment et de combiner les propriétés utiles de chacune d'elles pour obtenir un comportement souhaité du système. De plus, un système à structure variable peut avoir de nouvelles propriétés qui ne sont présentes dans aucune des structures qu'il utilise. Dans les systèmes à structure variable à mode glissant, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (Hyperplan), puis en utilisant la loi de commutation il est contraint de se situer au voisinage de cette surface. Cette dernière s'appelle la surface de glissement et le mouvement le long de celle-ci s'appelle le mouvement de glissement [66,67].

III.3 Généralités sur la commande par mode glissant

La commande par mode glissant est une structure variable de contrôle, qui par sa nature est un contrôle non linéaire. Enoncer au début des années 1950, son succès a été prouvé dans les problèmes de contrôle, car il est en mesure d'aborder les incertitudes du système et les perturbations externes avec une bonne robustesse [68]. Elle consiste à attirer la dynamique d'un système vers la surface de glissement, puis à la convertir à l'aide de la loi de commande vers le point d'équilibre.

Dans la littérature de contrôle, il a été convenu que le terme surface de glissement représente la fonction de commutation quel que soit l'ordre dans lequel le système est ajusté.

En général, la dynamique du système peut suivre différentes surfaces. La trajectoire dans le plan de phase se compose de trois parties bien différenciées, figure III.1[67] :

- Mode Convergence (MC) : Un mode dans lequel la variable contrôlée se déplace d'un point de départ arbitraire dans le plan de phase vers le bouton $S(x) = 0$ et l'atteint en temps constant. Ce mode est caractérisé par une loi de commande et un critère de convergence.
- Mode glissement (MG) : C'est le mode dans lequel les variables d'état atteignent la surface de glissement et se dirigent vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée en choisissant le plan de glissement $S(x) = 0$.
- Mode régime permanent (MRP) : Ce mode est ajouté pour étudier la réponse du système près du point d'équilibre (origine du plan de phase) et se caractérise par la qualité et la performance du contrôle. Il est utilisé notamment pour l'étude des systèmes non linéaires.

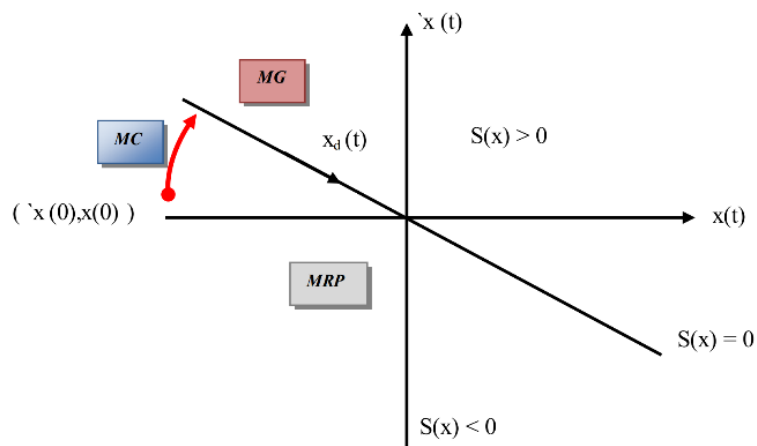


Figure III. 1: Les modes de trajectoire dans le plan de phase.

III.4 Conception de la commande par mode glissant

La création du contrôleur à modes glissants prend systématiquement en appréciation les aspects de stabilité et d'agréable performances dans son approche. Il se décompose en trois étapes principales [70] :

- 1- sélection de surfaces ;
- 2- la mise en place des conditions d'existence et de convergence;
- 3- définir la loi de commande.

III.4.1 Choix de la surface de glissement

L'élection des surfaces de glissement affecte non à le nombre de surfaces requises, mais également leur forme, en fonction de l'application et du but. En général, pour un système déterminé par l'équation d'état suivante [71,72] :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + b(x, t)U(t) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$x(t)$ Vecteur d'état, $U(t)$ vecteur d'entrée, et $f(x,t)$ et $B(x,t)$ des fonctions non linéaires. Un nombre de " m " surfaces de glissement pour un vecteur U de dimension " m ". En ce qui concerne la forme de la surface, deux possibilités se présentent, soit dans l'espace d'état ou dans le plan de phase

Lorsque vous travaillez dans l'espace des phases, la fonction de commutation est une fonction scalaire, de sorte que la variable de contrôle glisse sur ce plan pour blesser l'origine du plan des phases. Ainsi, la surface $S(x)$ représente l'acte dynamique souhaité du système.

J.J. Slotine présenté une sorte d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui garantit la convergence de la variable vers sa consigne. L'équation est donnée par :

$$S(t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Où :

$e(x)$: L'écart de la variable à réguler $e(x) = x_{ref} - x$;

λ_x : Une constante positive qui acte sur la plage de contrôle souhaité ;

r : Degré relatif, représentant le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire Apparaître la commande.

Pour $r = 1$, $S(x) = e(x)$;

Pour $r = 2$, $s(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$;

Pour $r = 3$, $s(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$.

$S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$.

Le but de cette commande est de conserver la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont la seule solution est $e(x) = 0$. Avec des paramètres bien

choisis, cela devient un problème de suivi de trajectoire équivalent à linéariser exactement l'écart tout en respectant les critères de convergence.

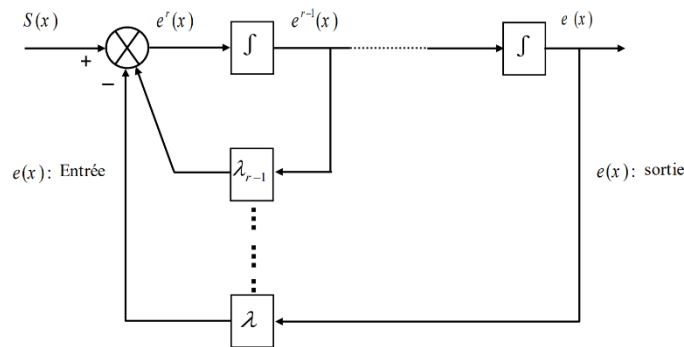


Figure III. 2: Linéarisation exacte de l'écart.

III.4.2 Conditions d'Existence et de Convergence du Régime Glissant

Les conditions de convergence sont les critères qui permet à la dynamique différentielle du système de converger vers la surface de glissement et de rester indépendantes des perturbations. Il y a deux considérations pour assurer le mode de convergence.

- Fonction directe de commutation :

C'est une fonction proposée et étudiée par Emilianov et Utkin. Cette condition est de forme :

$$S(x). \dot{S}(x) < 0 \tag{III.3}$$

- La Fonction de Lyapunov :

Il s'agit de construire une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction. Définissons donc une loi de contrôle, pour s'assurer que la dérivée d'une fonction scalaire de Lyapunov positive définie, et bien choisie, est négative. Cette propriété doit être vérifiée le long de toutes les trajectoires possibles du système en boucle fermée. Le problème consiste alors à trouver une fonction de Lyapunov et une loi de commande répondant aux exigences techniques. Pour des raisons de stabilité, ces méthodes sont plus adaptées aux systèmes non linéaires. Les solutions proposées sont spécialement conçues pour ce type de système [70].

$$\dot{V}(x) < 0 \quad \text{et} \quad V(x) > 0$$

En déduisant la fonction de Lyapunov et sa dérivée par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \tag{III.4}$$

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{III.5})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroît, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative, ceci est vérifié si :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.6})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par $S^2(x)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés figure 3.3. Cette condition suppose un régime glissant idéal.

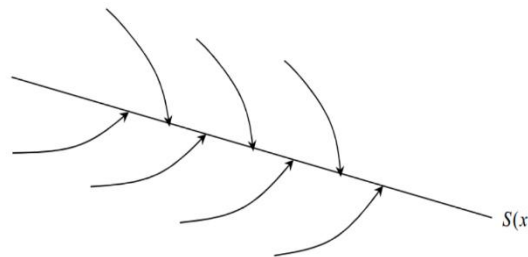


Figure III. 3: Trajectoire d'état pour la surface.

III.4.3 Détermination de loi de commande

Une fois la surface de glissement et le critère de convergence sélectionnés, la commande nécessaire pour déplacer la variable du levier de commande vers la surface de glissement puis revenir à son point d'équilibre est à déterminer en maintenant l'existence des modes de glissement [71,73].

La structure d'un contrôleur par mode de glissement du premier ordre est composée de deux parties : (u_{eq}) et (u_n), nous avons donc :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n \quad (\text{III.7})$$

u_{eq} : C'est la commande équivalente qui est une fonction continue sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x)=0$.

u_n : C'est la commande discontinue déduite en posant $\dot{S}(x) = 0$, elle permet d'éliminer les perturbations extérieures sur le modèle et l'effets d'imprécisions, et assure une convergence et un régime glissant.

L'instruction équivalente peut être comprise comme la valeur moyenne que prend l'instruction lors de la commutation rapide entre U_{max} , U_{min} .

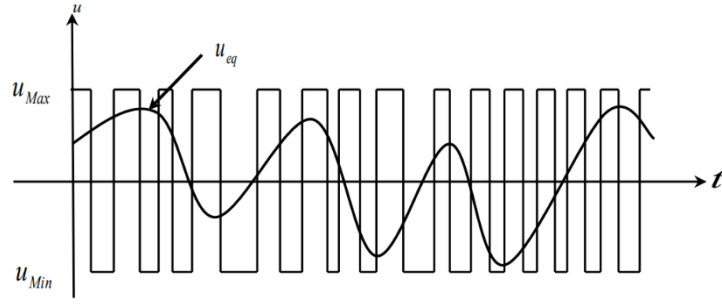


Figure III. 4: La valeur de la commande u_{eq} lors de la commutation entre u_{Max} et u_{Min} .

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dS}{dx} \{f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)\} + \frac{dS}{dx} \{g(x, t)u_n\} \quad (III.8)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, la surface de glissement, sa dérivée et la partie discontinue sont nulles. D'où, l'expression de la commande équivalente donnée par :

$$\begin{cases} u_{eq}(t) = - \left\{ \frac{dS}{dx} g(x, t) \right\}^{-1} \cdot \left\{ \frac{dS}{dx} f(x, t) \right\} \\ u_n = 0 \end{cases} \quad (III.9)$$

Avec la condition d'existence :

$$\left\{ \frac{dS}{dx} g(x, t) \right\}^{-1} \neq 0 \quad (III.10)$$

u_n : Est un achèvement introduit pour apaiser l'état de convergence $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$. En mode convergé et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.8) on obtient une nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} \{g(x, t)u_n\} \quad (III.11)$$

Le problème revient à trouver u_n tel quel :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \frac{dS}{dt} \{g(x, t)u_n\} < 0 \quad (III.12)$$

Pour cette condition soit satisfaite, le signe de u_n doit être opposé au signe de $S(x) \frac{dS}{dt} g(x, t)$

En général, la commande à mode glissant discret peut prendre la forme d'un type de relais donné par :

$$U_n = K \cdot \text{sgn}(S(x)) \quad (III.13)$$

Où « sgn » est la fonction définie par :

$$\text{sgn}(S(x)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S(x) > 0 \\ -1 & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

La figure III.5 représente la fonction « sgn » :

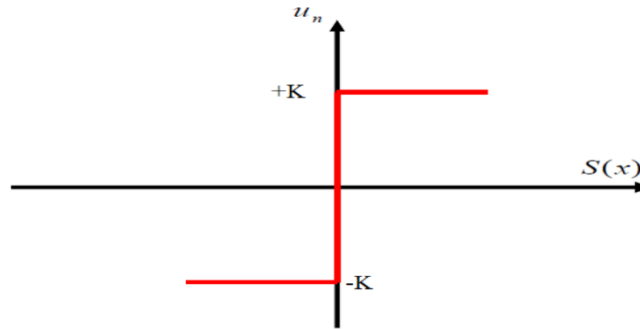


Figure III. 5: Représentation de la fonction « sgn ».

En substitution l'expression (24) dans (23), on obtient :

$$S(x). \dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} g(x, t) K[S(x)] < 0 \quad (\text{III.15})$$

Où :

Le facteur $\frac{dS}{dt} g(x, t)$ est toujours négatif.

Le gain K est choisi positif pour apaiser la condition (III.15).

L'utilisation de la fonction « signe or sgn » signifie que la commande " u_n" commute entre deux valeurs ± K avec une fréquence théoriquement infinie. Ce qui cause un phénomène dit « Chattering».

III.4.4 Elimination du phénomène de chattering

Le phénomène de chattering est causé par une commutation de contrôle rapide illimitée lors de l'utilisation de la technique du mode glissant. Ce phénomène est indésirable car il ajoute des composantes haute fréquence au spectre de commande [69,64].

Le phénomène de broutage peut être atténué en remplaçant la fonction « signe » par une fonction de saturation adaptée qui supprime les hautes fréquences. L'équation (IV.19) donne un exemple de fonction saturante Figure III.5.

- Fonction SAT

$$\begin{cases} \text{sat}(S) = 1 & \text{si } S > \mu \\ \text{sat}(S) = -1 & \text{si } S < -\mu \\ \text{sat}(S) = \frac{S}{\mu} & \text{si } |S| < \mu \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

μ : Un paramètre petit et positif.

- Fonction **SMOOTH**

On peut aussi remplacer la fonction « sign » par une fonction de classe C^1 . On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction.

$$Smooth(S) = \frac{S}{|S| + \mu}$$

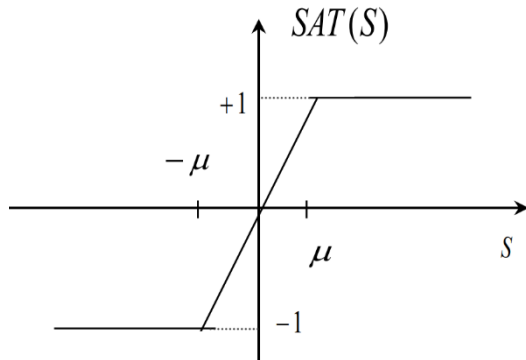


Figure III. 6: Fonction « Sat ».

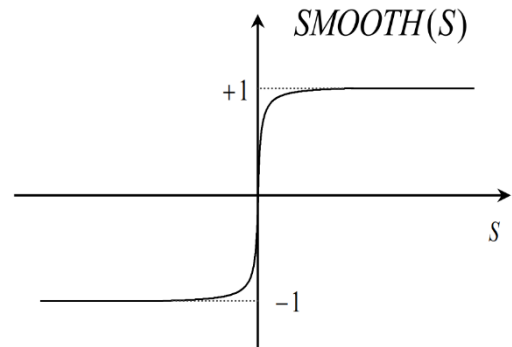


Figure III. 7: Fonction « Smooth ».

III.5 Application de la commande par mode de glissement à la GSAP

Après avoir présenté la théorie de la commande à structure variable (CSV) avec diverses structures de commande non linéaires, Dans cette section, nous analysons l'application du contrôle par mode glissant au contrôle de vitesse des générateurs synchrones à aimants permanents et validons l'approche présentée par les résultats de simulation. Aussi les équations électrique ainsi que les équations mécanique qui décrivent la dynamique de la machine [74].

$$\begin{cases} i_d = -\frac{R_s}{L_{sd}} i_d + \omega \frac{L_q}{L_{sd}} i_q + \frac{V_d}{L_s} \\ i_q = -\frac{R_s}{L_{sq}} i_q - \omega \frac{L_d}{L_{sq}} i_d - \omega \frac{\varphi_f}{L_{sq}} + \frac{V_q}{L_{sq}} \\ Te = \frac{3}{2} P \varphi_f i_q \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

III.5.1 Stratégie de réglage à deux surfaces

Le réglage de la vitesse de la GSAP nécessite le contrôle du courant absorbé par la machine. Une solution classique consiste à utiliser le principe de la méthode de réglage en cascade (structure de deux surfaces) ; Le mécanisme de contrôle suggéré est illustré sur la figure 3.7 sous la forme d'une cascade, nécessitant deux surfaces [75,76].

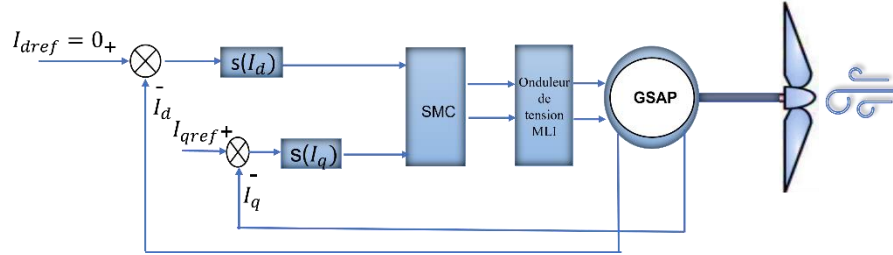


Figure III. 8: Schéma du système proposé.

III.5.2 Commande du courant direct (i_d)

L'erreur du courant direct est calculée comme suit :

$$e_d = I_{dref} - I_d \quad (III.18)$$

Le degré de la surface de glissement est égal à un $n=1$, donc nous déduisons l'expression de la surface :

$$s(i_d) = i_{dref} - i_d \quad (III.19)$$

La dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{s}(i_d) = \dot{I}_{dref} - \dot{I}_d = \dot{I}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\omega_r \frac{L_q}{L_d} I_q - \frac{1}{L_d} V_d \quad (III.20)$$

Durant le régime permanent, la surface $S(i_d)$ devient nulle, de même que sa dérivée, ce qui conduit à l'expression de la commande équivalente :

$$\dot{s}(i_d) = 0 \Rightarrow v_{deq} = \left(\dot{I}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\omega_r \frac{L_q}{L_d} I_q \right) L_d \quad (III.21)$$

Et

$$v_{dn} = 0$$

Où V_{deq} et V_{dn} sont les deux composantes de la tension de commande V_d .

La condition $S(i_d) \cdot \dot{S}(i_d) < 0$ Est satisfaite par le choix suivant :

$$Vd_n = K_d \cdot \text{sat}(S(i_d))$$

Où :

K_d : constante positive ;

Par conséquent, la commande totale à la sortie du régulateur devient :

$$V_d = \left(\dot{I}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\omega_r \frac{L_q}{L_d} I_q \right) L_d + K_d \cdot \text{sat}(S(i_d)) \quad (\text{III.22})$$

III.5.3 Commande du courant quadrature (i_q)

L'erreur du courant quadrature est calculée comme suit :

$$e_q = I_{qref} - I_q \quad (\text{III.23})$$

Le degré de la surface de glissement est égal à un $n=1$, donc nous déduisons l'expression de la surface :

$$s(I_q) = I_{qref} - I_q \quad (\text{III.24})$$

La dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{s}(I_q) = \dot{I}_{qref} - \dot{I}_q = \dot{I}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} I_q - P\omega_r \frac{L_d}{L_q} I_d - \frac{1}{L_q} V_q + P\omega_r \frac{\varphi}{L_q} \quad (\text{III.25})$$

Durant le mode de glissement la surface $S(i_q)$ devient nulle de même que sa dérivée :

$$\dot{s}(i_q) = 0 \Rightarrow v_{qeq} = \left(\dot{I}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} I_q - P\omega_r \frac{L_d}{L_q} I_d + P\omega_r \frac{\varphi}{L_q} \right) L_q \quad (\text{III.26})$$

Et

$$v_{qn} = 0$$

La condition $S(i_q) \cdot \dot{S}(i_q) < 0$ Est satisfaite par le choix suivant :

$$V_{qn} = K_q \cdot \text{sat}(S(i_q))$$

Où :

K_q : constante positive ;

Par conséquent, la commande V_q devient :

$$V_q = \left(\dot{I}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} I_q - P\omega_r \frac{L_d}{L_q} I_d + P\omega_r \frac{\varphi}{L_q} \right) L_q + K_q \cdot \text{sat}(S(i_q)) \quad (\text{III.27})$$

III.6 Simulations

Pour conclure sur les performances lors de l'utilisation d'une régulation selon le principe du mode glissant, nous présentons des simulations réalisées sur une GSAP avec un onduleur de tension implémenté numériquement dans Simulink/Matlab.

Dans ces simulations, des profils de vitesse de vent variables et fixes sont appliqués aux éoliennes et la robustesse du contrôleur aux variations de vitesse du vent est vérifiée.

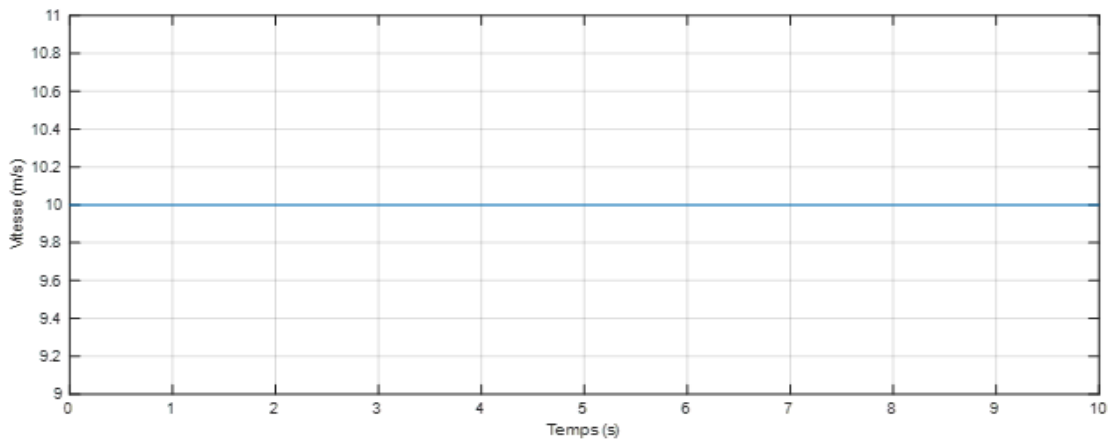


Figure III. 9: La vitesse du vent fixe.

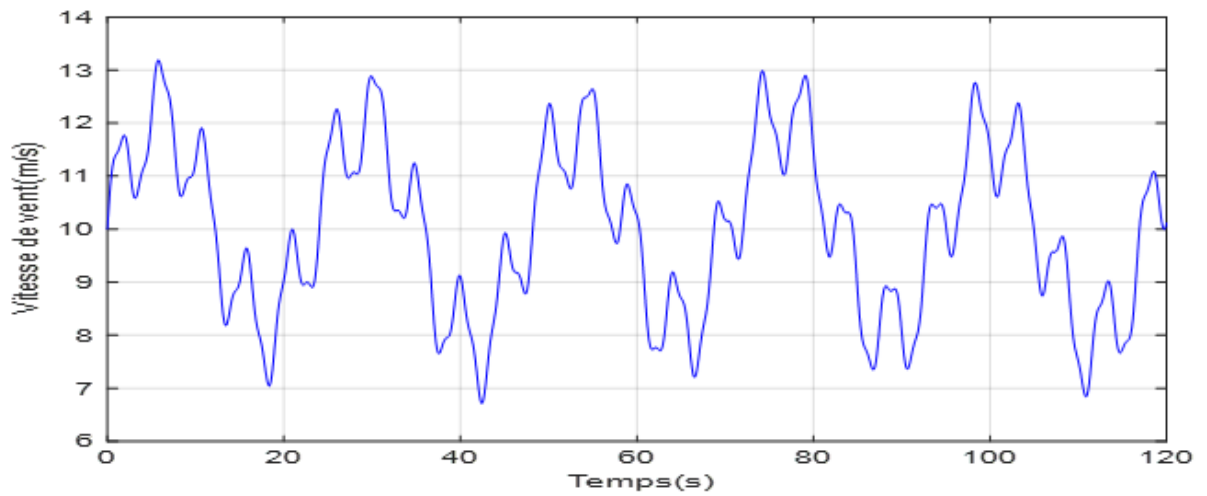


Figure III. 10: La vitesse du vent variable.

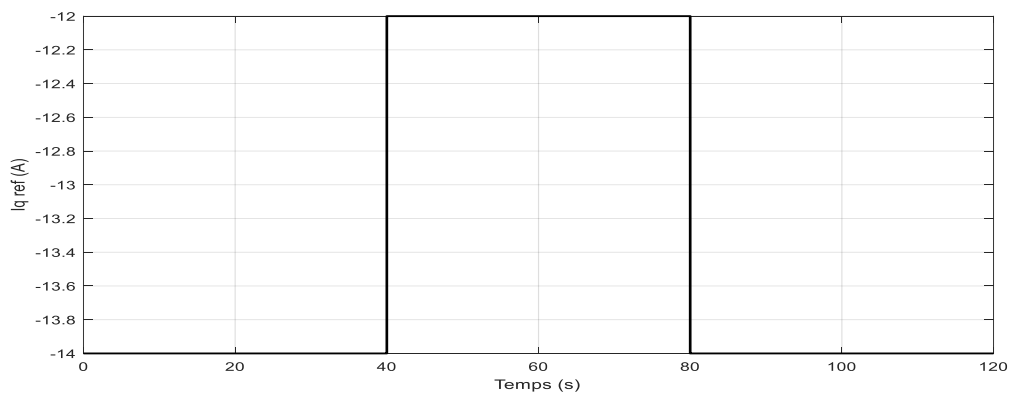
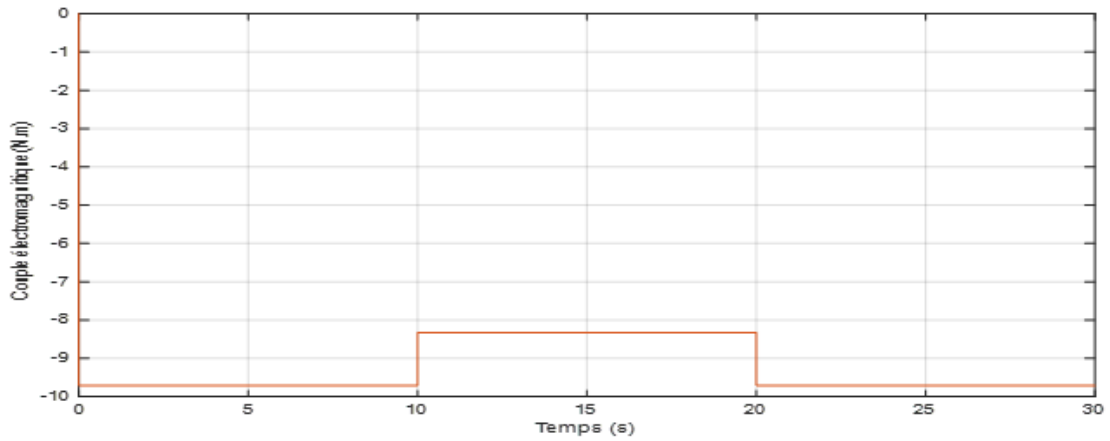


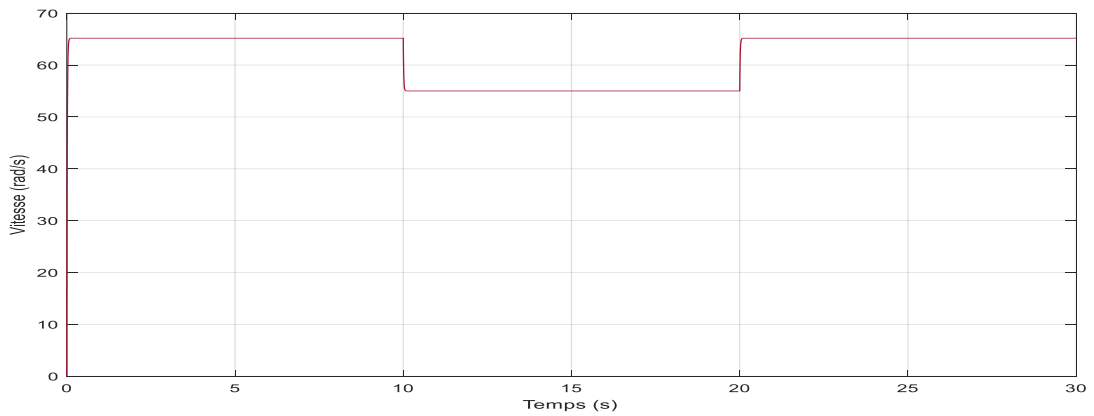
Figure III. 11: La référence du courant statorique I_q .

✓ Sans prise en compte de l'onduleur

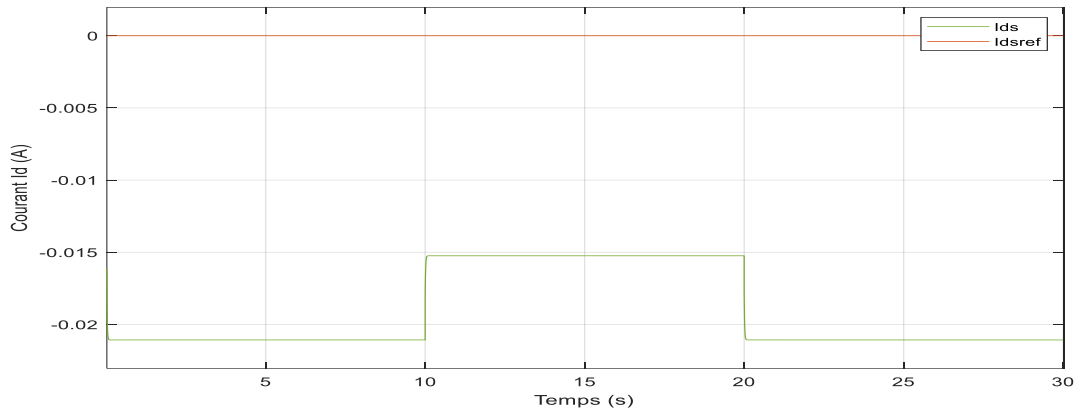
La figure III.12 et la figure III.13 présentent les résultats de simulation de la commande par mode glissant sans prise en compte de l'onduleur avec une vitesse du vent fixe et variable.



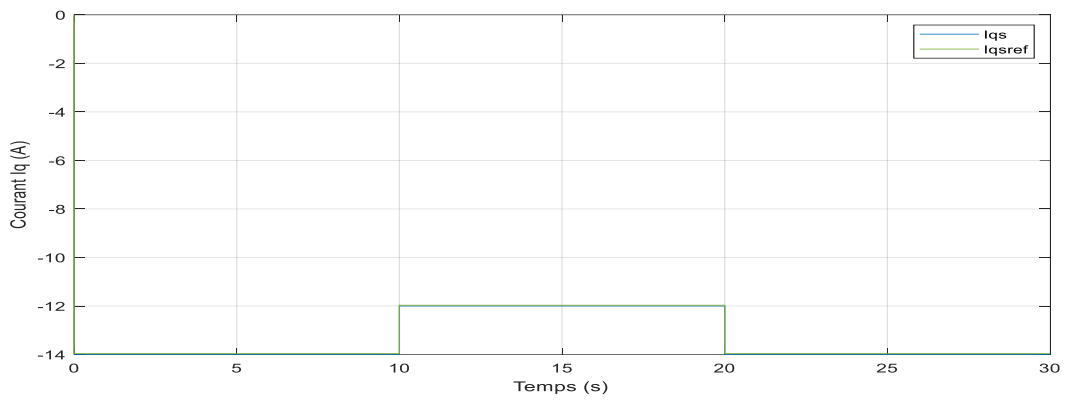
(a) Couple électromagnétique.



(b) Vitesse.

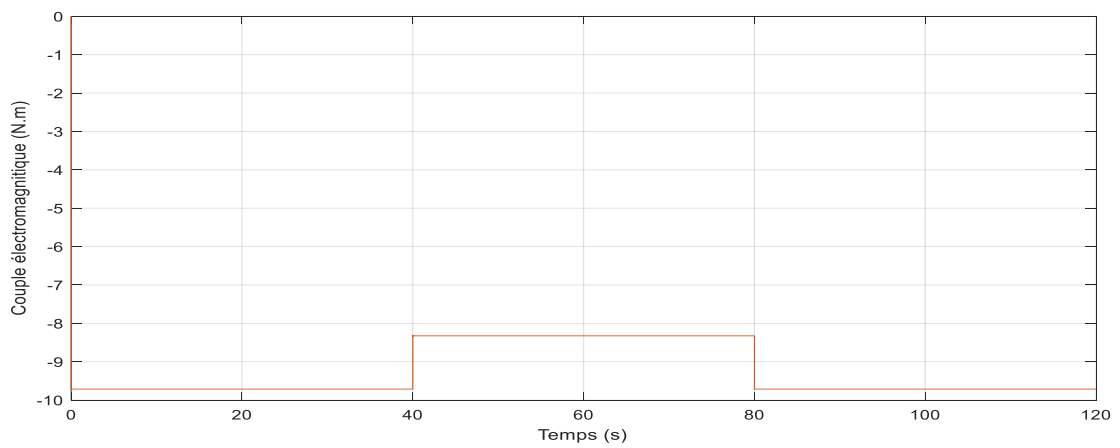


(c) Courant I_d .

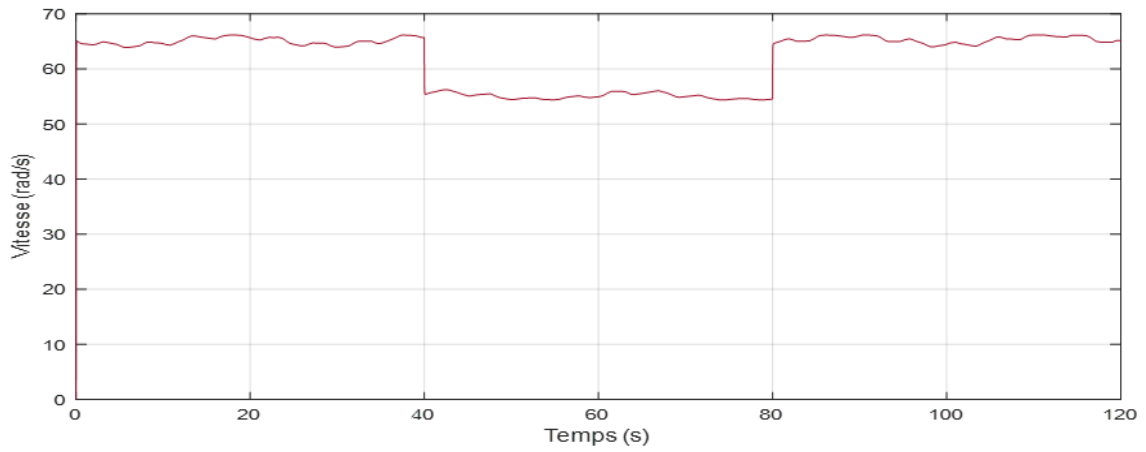


(d) Courant I_q .

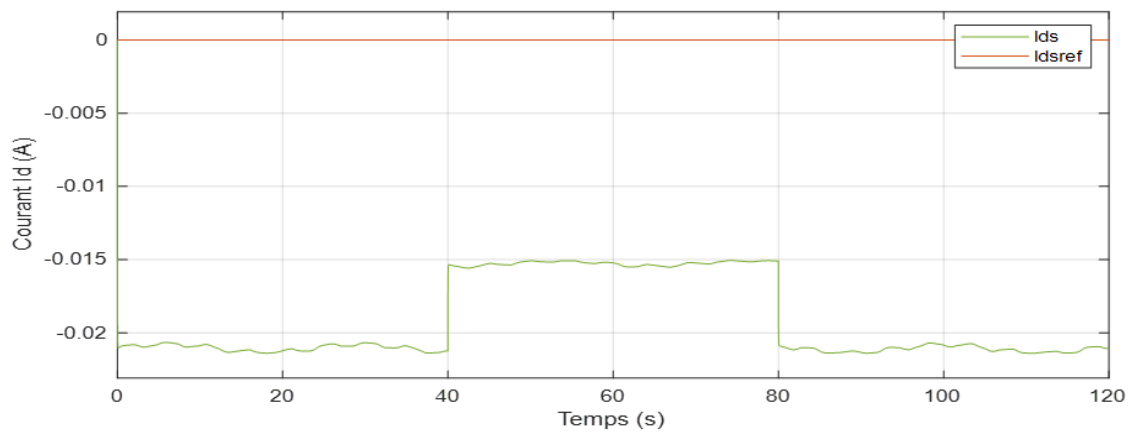
Figure III. 12: SMC vent fix sans onduleur.



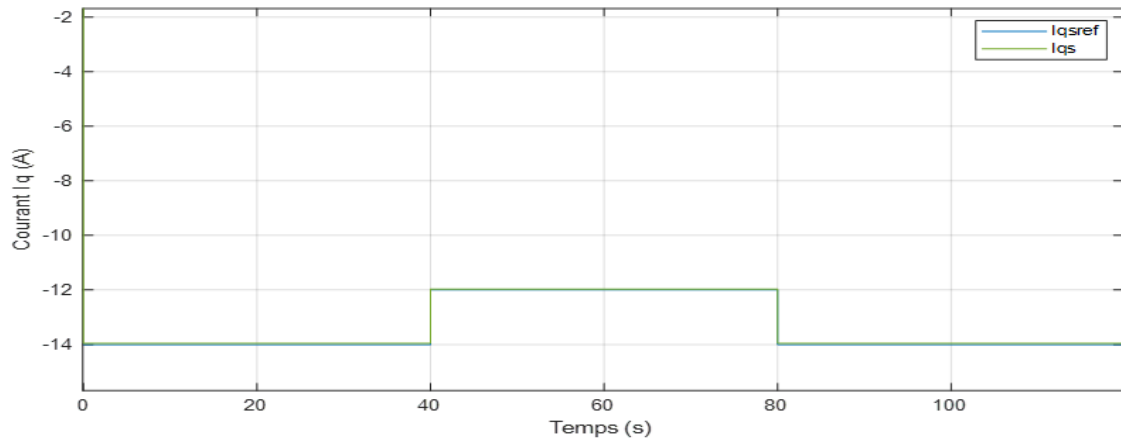
(a) Couple électromagnétique.



(b) Vitesse.



(c) Courant Id.

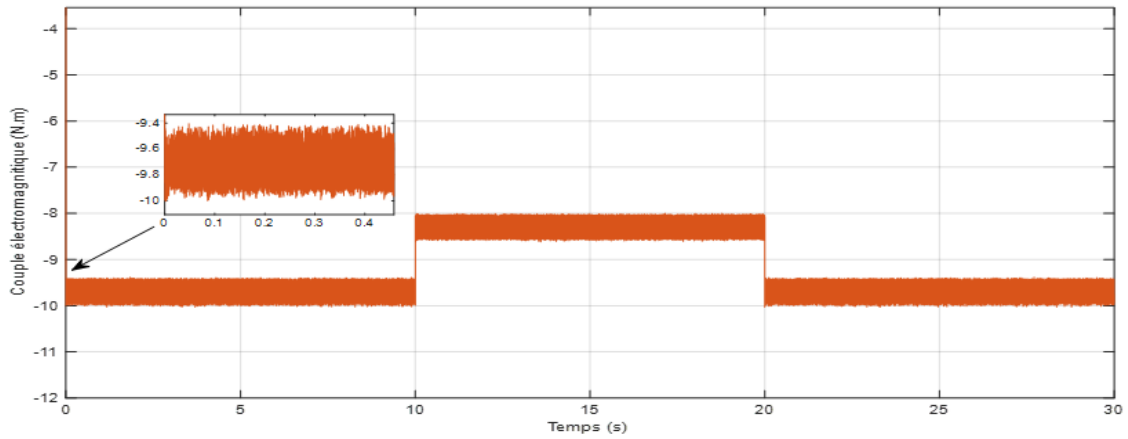


(d) Courant Iq.

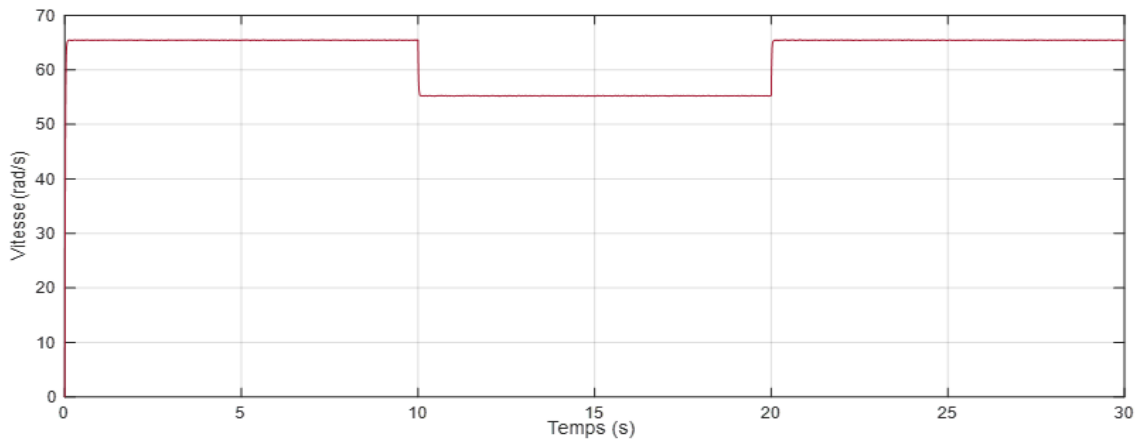
Figure III. 13: SMC vent variable sans ondulateur.

✓ Avec prise en compte de l'onduleur

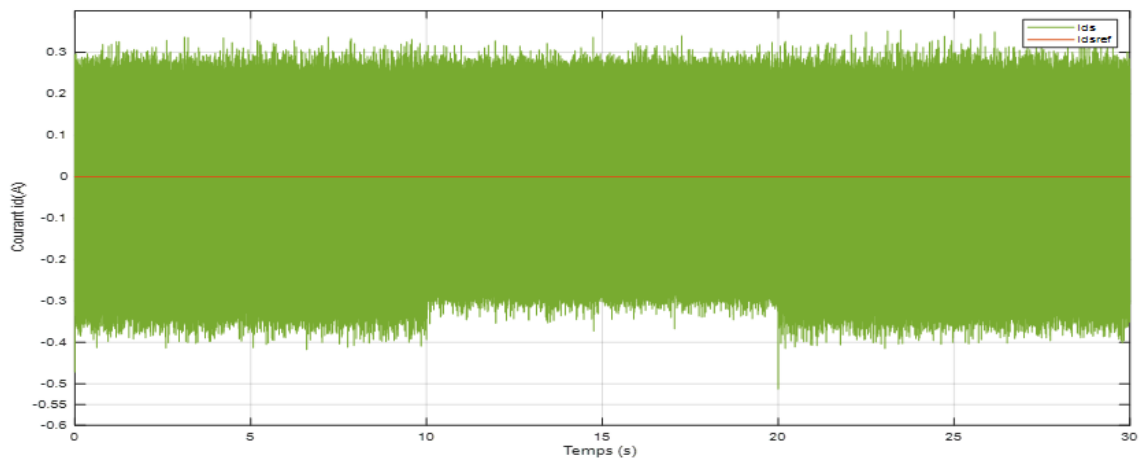
La figure III.14 et la figure III.15 présentent les résultats de simulation de la commande par mode glissant avec prise en compte de l'onduleur, cas avec une vitesse du vent fixe et xas avec une vitesse variable.



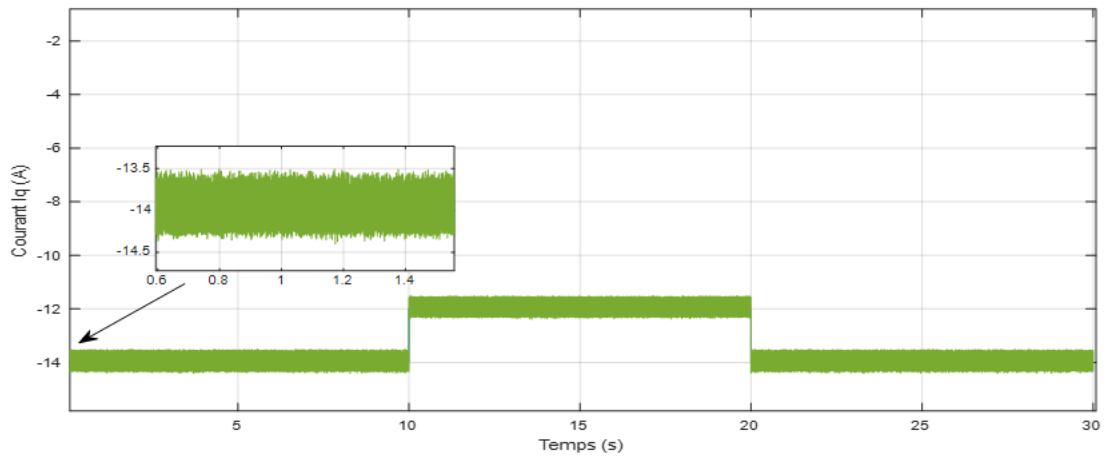
(a) Couple électromagnétique.



(b) Vitesse.

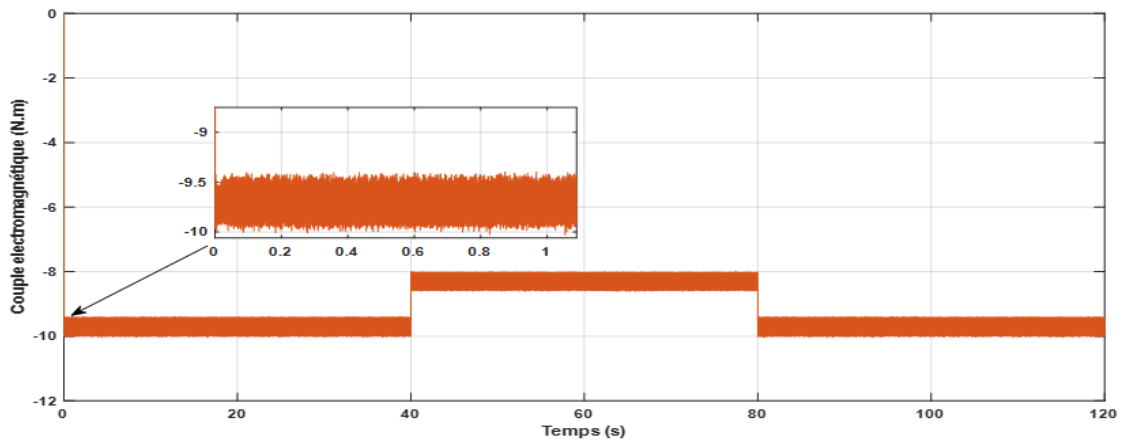


(c) Courant Id.

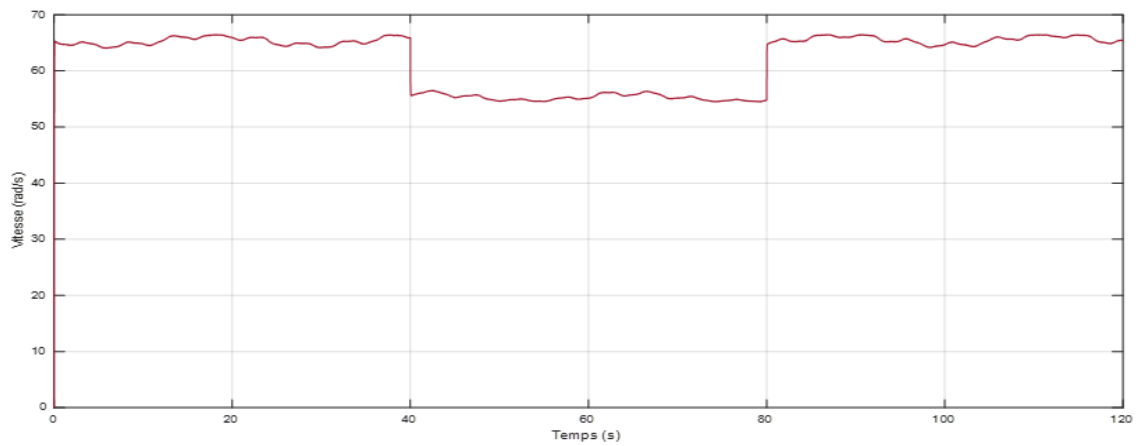


(d) Courant I_q .

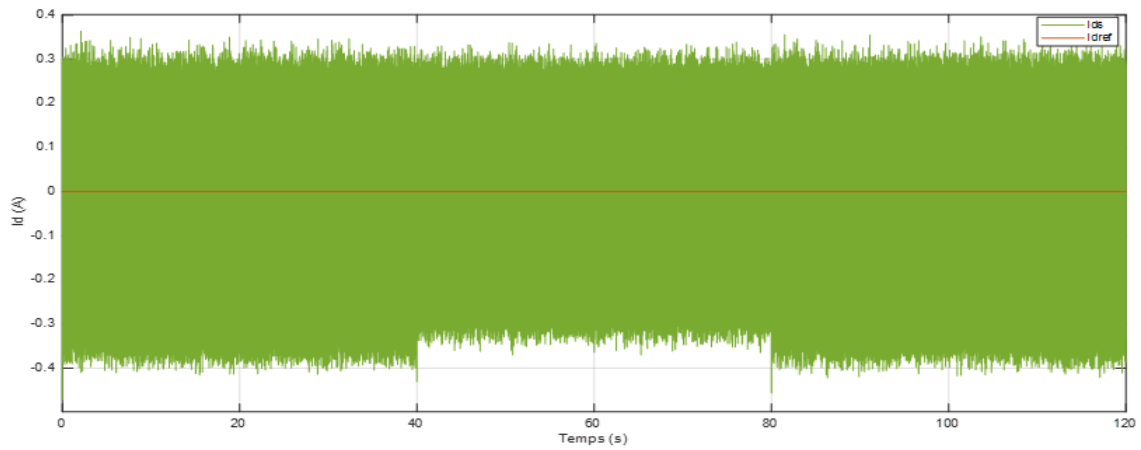
Figure III. 14: SMC vent fixe avec onduleur.



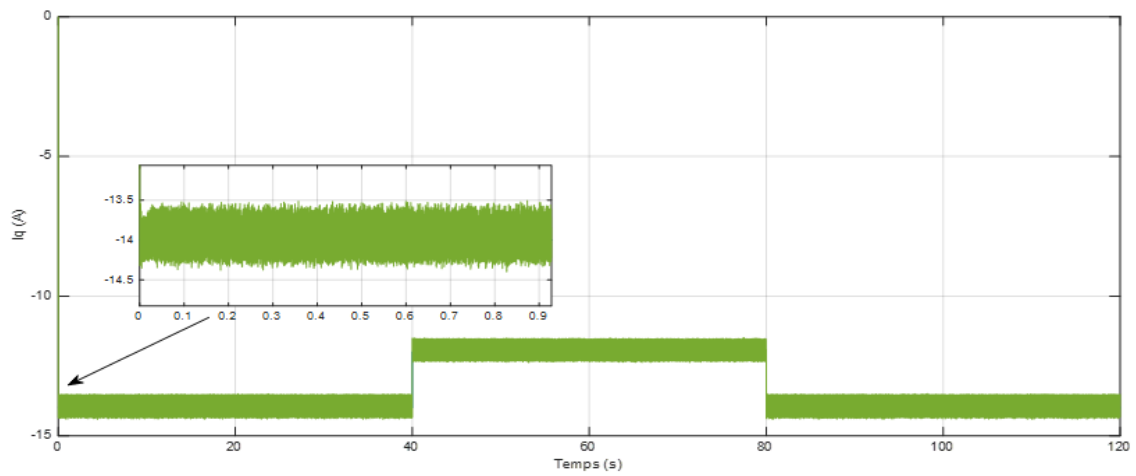
(a) Couple électromagnétique.



(b) Vitesse.



(c) Courant Id.

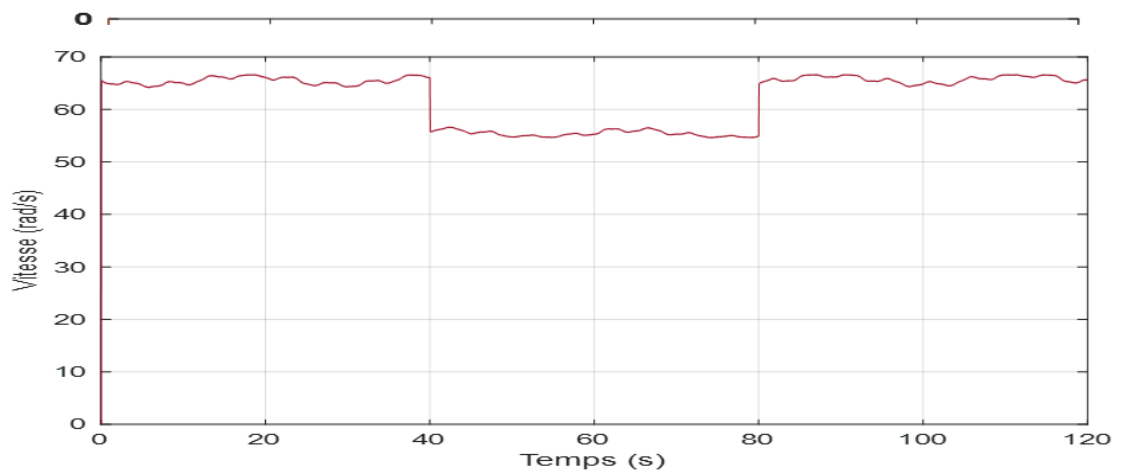


(d) Courant Iq.

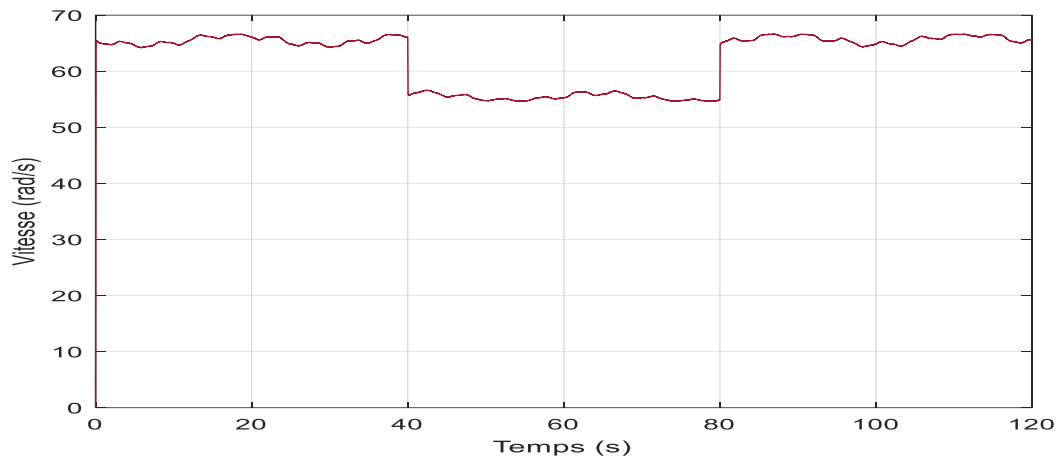
Figure III. 15: SMC vent variable avec onduleur.

III.6.1 Test de robustesse vis-à-vis à des variations paramétriques

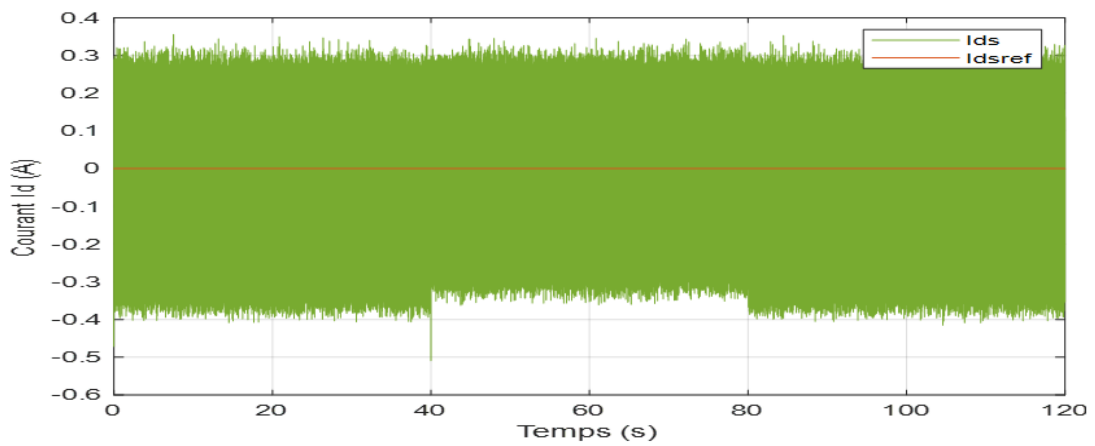
Dans le but de tester la robustesse de la commande vis-à-vis au changement paramétrique, nous avons augmenté la résistance statorique de la GSAP à +75% de sa valeur nominale.



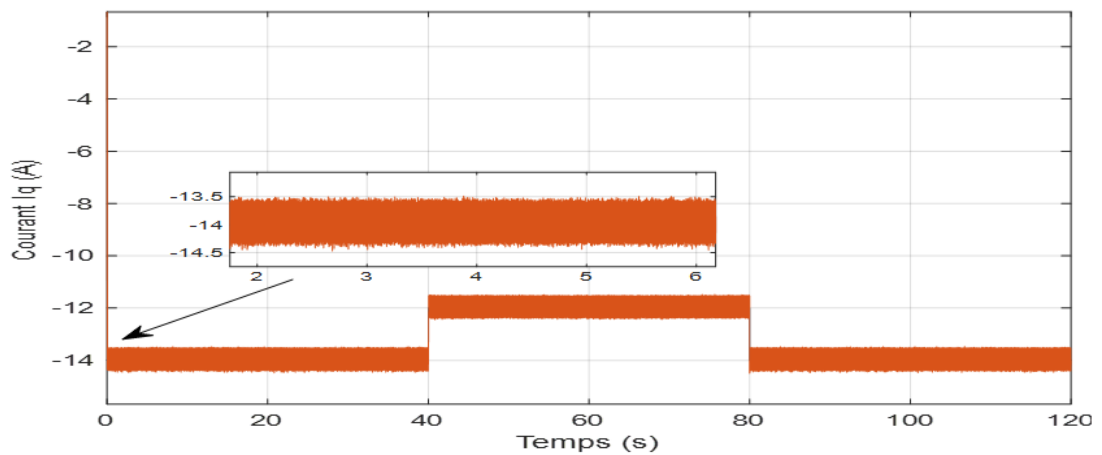
(a) Couple électromagnétique.



(c) Vitesse.



(b) Courant I_d .



(d) Courant I_q .

Figure III. 16: SMC vent variable avec onduleur.

Les résultats montrent que le couple électromagnétique et le courant de l'axe q du stator sont modifiés et contrôlés en fonction de la variation de la vitesse du vent et de la référence ; le courant de stator dans l'axe d est nul suivi sa référence $i_d=0$; Toutes ces grandeurs ont la même

forme car il existe une relation linéaire entre eux. Le temps de réponse de la vitesse GSAP est très court et il n'y a pas de dépassement.

D'après les résultats de la figure III.16, nous voyons clairement que la commande par mode glissant est insensible à la variation de la résistance statorique de la GSAP sans dépassement des grandeurs et sans erreur statique en régime permanent ce qui signifie la robustesse de la commande vis-à-vis changement paramétrique.

Sur la base des résultats de la simulation, on peut dire que la commande mode glissant fonctionne bien en termes de suivi des références, avec un temps de réponse très faible et une erreur statique pratiquement nulle. Le système répond positivement à ce test, il est insensible aux perturbations internes et externes, cette commande présente une bonne robustesse. Sauf que la commande mode glissant présente toujours des grandes oscillations au niveau des grandeurs, mais elle maintient toujours le découplage entre eux avec un meilleur suivi de consigne.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande non linéaire (mode glissant) appliquée sur la GSAP associé à une turbine éolienne ; nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande pour le control des courants statoriques i_d et i_q .

La commande par mode glissant présente plusieurs avantages tel que, robustesse, précision importante, stabilité et simplicité, temps de réponse très court. Cependant, on peut dire que de fortes vibrations des éléments de commande peuvent altérer les performances du système. Ce phénomène s'appelle le broutage(Chattering). Pour résoudre ce problème on fait appel à des techniques d'optimisation qui permet de réduire l'effet chattering, ces optimisations sont PSO et GWO qui serrent l'objet du quatrième chapitre.

Chapitre IV :

Optimisation du système de conversion d'énergie éolien

IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons mis en œuvre la commande du système par mode glissant ; les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette commande, l'insensibilité aux variations des paramètres internes et externes, sa stabilité, sa simplicité de mise en œuvre et ces temps de réponse très faibles.

Cependant, le principal inconvénient de cette commande est l'apparition de problème de broutement (Chattering) sur les réponses en régime permanent, qui peut desservir au fonctionnement du système. Ce phénomène se caractérise par de fortes oscillations de hautes fréquences autour de la surface de glissement [67].

Pour extraire la puissance maximale de Système de conversion d'énergie éolienne, l'objectif de contrôle peut être formulé comme un problème d'optimisation et il y a quelques difficultés à trouver les paramètres du contrôleur. Les méthodes déterministes semblent avoir répondu à ce besoin, mais le problème des optima locaux constitue un véritable piège pour s'approcher de l'optimum global. Par conséquent, l'utilisation de méthodes stochastiques connues sous le nom de méta-heuristiques, en général, évite ce problème et a un grand potentiel pour trouver l'optimum global. Les méta-heuristiques sont un ensemble d'algorithmes inspirés de la nature. Ces algorithmes sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes où les algorithmes d'optimisation classiques ne peuvent pas produire de résultats satisfaisants. Parmi ces techniques, celles basées sur l'intelligence collective, inspirées de la nature, sont les plus populaires :

algorithmes de colonies de fourmis (ACOs), algorithmes génétiques (GAs), optimisation Particle Swarm Optimization (PSO) et Grey Wolf Optimization (GWO) [77].

Dans cette étude, Pour éliminer le problème de Broutement, on a choisi deux types de algorithmes différents pour la régulation des courants statorique i_d et i_q , les algorithmes PSO et GWO sont appliqués pour sélectionner les paramètres optimaux du contrôleur SMC K_q et K_d (quadrature et directe constantes) afin d'obtenir le suivi de trajectoire requis et d'améliorer les performances globales du système.

Enfin, et pour montrer l'efficacité des algorithmes de commande proposé, des études comparatives vont être effectuées entre les résultats obtenus dans chaque cas.

IV.2 Optimisation de système de conversion d'énergie éolienne

L'optimisation est un instrument très puissant et polyvalent qui pourrait potentiellement être appliqué à n'importe quelle discipline d'ingénierie. L'optimisation est la technique d'admettre un problème du monde réel et de le transformer en un modèle mathématique qui peut être étudié pour extraire ses propriétés structurelles et caractériser les solutions au problème. Un algorithme d'optimisation est une procédure qui est exécutée itérativement en comparant diverses solutions jusqu'à ce qu'une solution optimale ou satisfaisante soit trouvée [78,79].

IV.2.1 Problème d'optimisation

Dans un problème d'optimisation, nous recherchons des valeurs des variables qui conduisent à une valeur optimale de la fonction qui doit être optimisée. L'ensemble des paramètres d'entrée peut être considéré comme l'ensemble des variables d'entrée du problème, une fois que le problème et ses variables d'entrée sont définis, une façon d'évaluer la performance du problème pour un échantillon donné est nécessaire.

La mesure de performance est appelée fonction objective, ou simplement objective et la plage de ses valeurs possibles est l'espace de solution S . Dans le cas le plus simple, l'objectif à optimiser peut-être l'un des paramètres de sortie. Sinon, il peut être une fonction des paramètres de sortie et aussi des variables d'entrée directement. Optimiser signifie trouver l'ensemble de variables d'entrée qui minimise (ou maximise) la fonction objective $f(x)$ ce concept est illustré à la figure IV.1.

Le processus d'optimisation est donc résumé mathématiquement comme suit : donné les paramètres d'entrée m v_i , $i = 1, \dots, m$ et $n \leq m$ variables d'entrée x_j , $j = 1, \dots, n$, les espaces géométriques euclidiens des paramètres d'entrée et les variables de l'entrée sont respectivement \mathbb{R}^m et \mathbb{R}^n . En raison de la présence des contraintes sur les paramètres d'entrée et sur les variables d'entrée leurs domaines sont limités à $V \subseteq \mathbb{R}^m$ et $X \subseteq \mathbb{R}^n$ ($X \subseteq V$). Comme nous ne sommes pas intéressés par les paramètres d'entrée pour objectif d'optimisation, nous laissons v_i et V derrière. Considérons p paramètres de sortie w_k , $k = 1, \dots, p$ et une fonction objective y , nous avons

$$g(x) : X \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow W \subseteq \mathbb{R}^p, \quad w_k = g_k(x), k = 1, \dots, p$$

$$f(x) : X \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow Y \subseteq \mathbb{R}, \quad y = f(x, w) = f(x, g(x)) = f(x)$$

Où g et f sont les fonctions définissant respectivement les paramètres de sortie et la fonction objective. Les deux fonctions ont l'espace de conception X pour le domaine, tandis

que leurs plages sont $W \subseteq \mathbb{R}^p$ pour les paramètres de sortie, et l'espace de solution $Y \subseteq \mathbb{R}$ pour la fonction objective. Le but de l'optimisation est de

$$\text{Minimiser } x f(x), x \in X \subseteq \mathbb{R}^n.$$

Pour ce faire, une procédure itérative basée sur une méthode d'optimisation particulière est nécessaire. Une fois les itérations S terminées, la méthode d'optimisation choisit $x^{(s+1)}$ sur la base des informations collectées jusqu'à présent, c'est-à-dire $y^{(r)} = f(x^{(r)})$, $r = 1, \dots, s$. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit rempli. À la fin, comme l'algorithme a été arrêté après l'itération t , la solution x^* est choisie comme solution optimale trouvée [80].

$$X^* \in \{x^{(1)}, \dots, x^{(t)}\} : y(x^*) = \min_{r=1, \dots, t} y(x^{(r)})$$

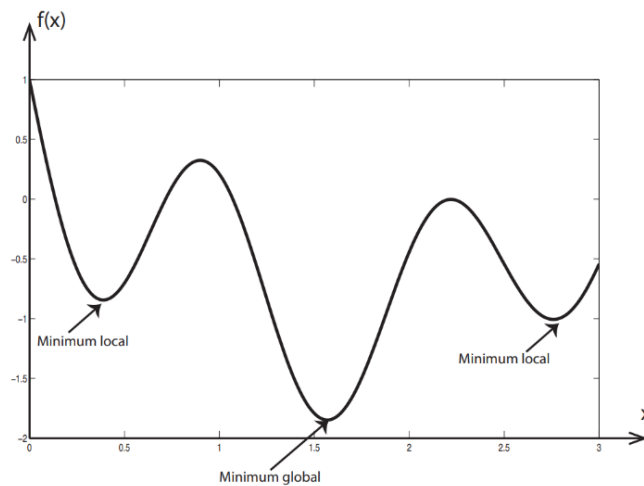


Figure IV. 1: Différence entre un optimum global et des optima locaux.

IV.2.2 Classification des méthodes d'optimisation

Un problème d'optimisation est résolu en utilisant des méthodes exactes, mais lorsque l'on rencontre un problème difficile, on utilise des méthodes approchées. En ce cas, il est de temps en temps possible de choisir entre une heuristique spécifique, consacré au problème considéré, et une meta-heuristique, qui est une approche générale [81]. Parmi les meta-heuristique, on distingue une basés sur le voisinage et autre basés sur la population. Enfin, les méthodes hybrides combinent souvent des méthodes métaheuristiques et locales [77].

IV.2.3 Métaheuristique

La métaheuristique est un terme utilisé pour décrire un sous-champ majeur, en fait le sous-champ primaire, de l'optimisation stochastique. L'optimisation stochastique est la classe générale des algorithmes et des techniques qui utilisent un certain degré de hasard pour trouver des solutions optimal aux problèmes difficiles. La métaheuristique est le plus général de ces types d'algorithmes, et est appliquée à un très large éventail de problèmes.

Un algorithme métaheuristique est une procédure de recherche conçue pour trouver, une bonne solution à un problème d'optimisation qui est complexe et difficile à résoudre à l'optimalité. Il est impératif de trouver une solution presque optimale basée sur des informations imparfaites ou incomplètes dans ce monde réel de ressources limitées (par exemple, la puissance de calcul et le temps). L'émergence de la métaheuristique pour résoudre de tels problèmes d'optimisation est l'une des réalisations les plus remarquables des deux dernières décennies dans la recherche opérationnelle.

La métaheuristique peut souvent trouver de bonnes solutions avec moins d'effort de calcul que les algorithmes d'optimisation, les méthodes itératives et l'heuristique simple avide. Il existe différentes variétés de problèmes qui sont impossibles à résoudre en utilisant un algorithme d'optimisation à l'optimalité globale. Par exemple, un problème d'optimisation devient complexe lorsqu'il y a des variables aléatoires stochastiques présentes dans l'objectif ou les contraintes. Par conséquent, il n'est pas facile de résoudre des programmes stochastiques à grande échelle en utilisant une programmation stochastique ou des techniques d'optimisation robustes.

La métaheuristique peut jouer un rôle clé dans différents domaines. En substance, de nombreux problèmes d'optimisation sont des fonctions multi-objectifs avec des contraintes non linéaires. Par exemple, la plupart des problèmes d'optimisation technique sont hautement non linéaires et nécessitent des solutions à des problèmes multi-objectifs. D'autre part, l'intelligence artificielle et les problèmes d'apprentissage automatique reposent fortement sur de grands ensembles de données, et il est difficile de formuler le problème d'optimisation à résoudre pour optimiser. Par conséquent, la métaheuristique joue un rôle important dans la résolution de problèmes pratiques qui sont difficiles à résoudre en utilisant des méthodes d'optimisation conventionnelles [82].

IV.2.4 Optimisation multi-objectif

Les problèmes d'optimisation multi-objectifs ont été au centre pendant longtemps en raison de leurs applications vastes. Les solutions aux multi-objectifs optimisation ne sont pas certains points, mais forment plutôt un ensemble appelé Pareto set et l'ensemble des valeurs de fonction objectives correspondantes est appelé Pareto front. Un problème d'optimisation multi-objectif peut être exprimé comme suit [83,84]:

$$\min_{k \in Q} \{F(k)\},$$

Où F est la surface qui se compose des fonctions objectives $f_i : Q \rightarrow \mathbb{R}^1$ sous considération.

Dans un algorithme multi-objectif la capacité de maximiser le nombre d'éléments dans l'ensemble de Pareto, minimiser la distance de la frontière de Pareto approximative de la véritable frontière de Pareto, maximiser la propagation des solutions, et maintenir la diversité dans la population sont appréciés.

D'autres concepts communs à l'optimisation stochastique sont ceux de la population et de l'individu. Les méthodes d'optimisation déterministes, partent d'un point dans l'espace de conception et calculent la prochaine itération en rapprochant les gradients et les hessiens. L'optimisation stochastique à la place, commence généralement à partir d'un ensemble d'échantillons dans l'espace de conception, et selon différentes règles, fait évoluer cet ensemble à travers plusieurs itérations. L'ensemble d'échantillons est appelé population. Chaque échantillon de la population est appelé individu. La taille de la population,

C'est-à-dire que le nombre d'individus composant la population, est maintenu constant à travers les itérations. En règle générale, la taille devrait être d'au moins 16 et peut-être plus du double du nombre de variables d'entrée multiplié par le nombre d'objectifs. Compte tenu d'une population initiale composée de m individus, l'exécution du processus d'optimisation pour n itérations signifie effectuer des expériences ou des simulations [86].

IV.3 Essaim particulaire optimisation (OEP)

IV.3.1 Principe

Particle Swarm Optimization (PSO) est une technique d'optimisation stochastique quelque peu similaire aux algorithmes évolutifs, mais différente d'une manière importante. Il n'est pas modelé sur l'évolution en soi, mais sur les comportements d'essaimage et de flocage chez les animaux. Contrairement aux autres méthodes fondées sur la population, le PSO ne rééchantillonne pas les populations pour en produire de nouvelles : il n'a aucune sélection.

Au lieu de cela, PSO maintient une seule population statique dont les membres sont peaufinés en réponse à de nouvelles découvertes sur l'espace. La méthode est essentiellement une forme de mutation dirigée. La technique a été développée par James Kennedy et Russell Eberhart au milieu des années 1990 [87]. PSO est inspiré par les essaims, les praticiens de PSO ont tendance à se référer aux solutions candidates non pas comme une population d'individus, mais comme un essaim de particules. Une particule se compose de deux parties [77] :

- L'emplacement de la particule dans l'espace, $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots)$.
- La vitesse de la particule, $\vec{v} = (v_1, v_2, \dots)$. C'est la vitesse et la direction auxquelles la particule se déplace à chaque pas du temps. Autrement dit, si $\vec{x}^{(t-1)}$ et $\vec{x}^{(t)}$ sont les emplacements dans l'espace de la particule à des moments $t-1$ et t respectivement.



Figure IV. 2: organisation dans les systèmes biologiques : (a) Une colonie de fourmis qui ramène de la nourriture vers le nid (b) un essaim d'abeilles (c) un vol groupé d'oiseaux (d) une formation de bactéries [77].

La Figure IV.3 illustre la stratégie de déplacement d'une particule [88,89,90].

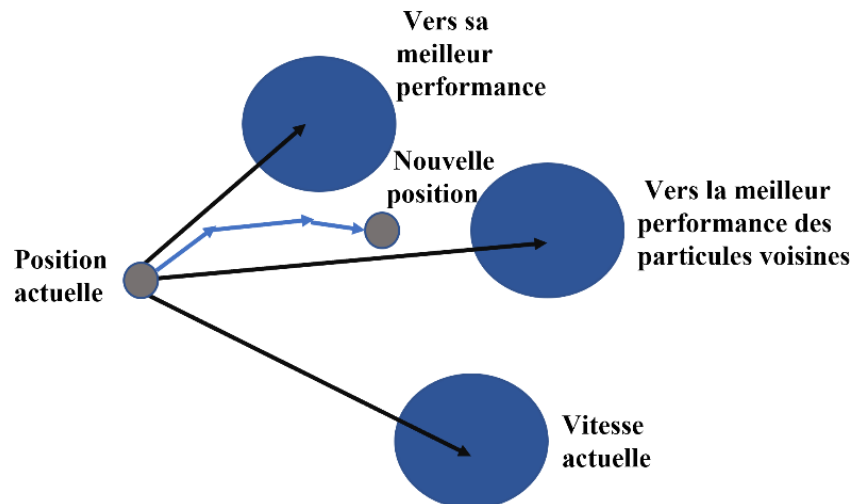


Figure IV. 3: Schéma de Déplacement d'une particule.

Chaque particule commence à un endroit aléatoire et avec un vecteur de vitesse aléatoire, souvent calculé en choisissant deux points aléatoires dans l'espace et en utilisant la moitié du vecteur de l'un à l'autre il faut aussi faire le suivi de quelques autres choses [88,89,90] :

- Le meilleur emplacement connu \vec{x}^* que \vec{x} a découvert jusqu'à présent.
- Le meilleur emplacement connu \vec{x}^+ que n'importe lequel des informateurs de \vec{x} a découvert.
- Le meilleur emplacement connu $\vec{x}^!$ qui a été découvert par quiconque.

PSO est un algorithme évolutif basé sur la population dans lequel la meilleure solution peut être représentée comme un vecteur dans un espace n-dimensionnel. Dans chaque itération, la vitesse (v_{ij}) et la position (x_i) des particules sont contrôlées pour converger vers la solution presque optimale qui maximise ou minimise la fonction objective. Les particules se déplacent dans l'espace de solution et sont évaluées en fonction d'une fonction de condition physique. Dans chaque itération, les particules sont mises à jour avec deux valeurs, à savoir p_{Best} et g_{Best} . p_{Best} (y_{ij}) est la meilleure solution obtenue, alors que le g_{Best} (z_j) est la deuxième meilleure valeur obtenue par n'importe quelle particule de la population. L'exploration se produit avec la recherche de voisinage et réduit la susceptibilité de PSO tombant dans optima local mais ralentit la vitesse de convergence.

La position au temps t de la particule i est alors définie par l'équation suivante :

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1), j \in \{1, 2, \dots, d\} \quad (\text{IV.1})$$

Tableau IV. 2: Algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP).

OEP(PSO)

Initialisation aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule

Evaluer les positions des particules

Pour chaque particule i , $P_i = X_i$

Calculer les g_i

Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint faire

Pour $i = 1$ à N faire

Déplacer les particules selon (IV.1), (IV.2)

Évaluation des positions

Si $f(X_i) < f(P_i)$

$$P_i = X_i$$

Fin Si

Si $f(P_i) < f(P_g)$

$$P_g = P_i$$

Fin Si

Fin Pour

Fin Tant que

IV.3.2 Modélisation et application du PSO sur contrôleur mode glissant

Dans cette section, la modélisation mathématique de la hiérarchie sociale des essaims particuliers et leur technique dans l'algorithme PSO sont détaillées. Dans PSO L'essaim est modélisé comme particules dans un espace multidimensionnel, qui ont des positions et des vitesses. Ces particules ont deux capacités essentielles : leur mémoire de leur meilleure position et connaissance de la meilleure position mondiale. Les membres d'un essaim communiquent

bien positions les unes par rapport aux autres et ajuster leur propre position et vitesse basée sur de bonnes positions. Les particules sont mises à jour selon l'équation suivante [91,92] :

$$\begin{cases} x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \\ v_{k+1}^i = Wv_k^i + c_1r_1(P_{meilleure}^i - x_k^i) + c_2r_2(g_{meilleure}^i - x_k^i) \end{cases} \quad (IV.2)$$

$P_{meilleure}$: meilleure position d'une particule spécifique.

$g_{meilleure}$: meilleure position des particules du groupe.

Où w est une constante communément appelée facteur d'inertie; r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$, c_1 et c_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération à chaque itération et pour chaque dimension.

L'algorithme PSO peut être exécuté dans les étapes suivantes :

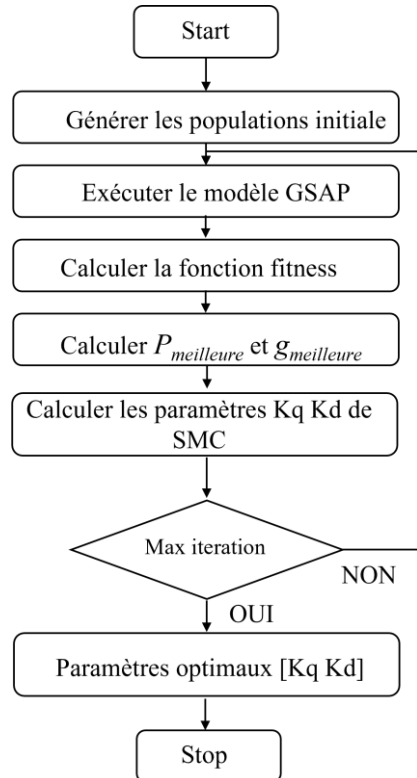


Figure IV. 4: Organigramme de PSO-SMC.

IV.4 Optimisation par les loups gris (GWO)

Comme d'autres essais et évaluations biologiques, les loups gris et leurs meutes ont été la source d'inspiration d'un sous-ensemble d'algorithmes évolutionnaires. Ces algorithmes sont principalement basés sur le mécanisme de chasse et la structure hiérarchique des loups gris.

Dans une meute de loups gris, il y a 4 types d'individus - alpha α , bêta β , delta δ et oméga ω . Un loup alpha est considéré comme le chef de la meute, responsable de la prise de décision principale, et le premier à proie. Le loup bêta est une filiale de l'alpha, et l'aide dans la prise de décisions. Les loups de rang inférieur sont appelés omegas. Et, le loup qui ne rentre dans aucune catégorie est considéré comme loup delta. Dans la nature, ils sont généralement les aînés, les scouts ou les sentinelles. La figure IV. 5 montre la structure hiérarchique de ces loups [93].

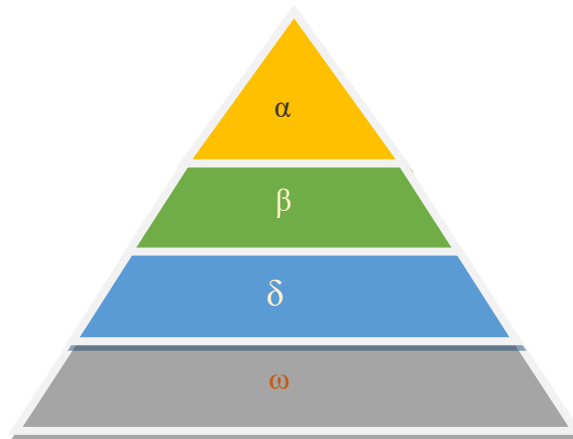


Figure IV. 6: L'organigramme de l'optimisation du loup gris (GWO).

En plus de la structure hiérarchique, le mécanisme de chasse des loups gris est également important, qui peut être divisé en trois grandes étapes. Selon Muro et al. [47] les principales phases de la chasse au loup gris sont les suit [94] :

- (1) Approche : À cette étape, la meute couvre beaucoup de terrain et explore la région ;
- (2) Encerclement : C'est la deuxième étape dans laquelle de nombreux membres de la meute, et dans certains cas, tous, entourent la proie, la piégeant afin que les loups puissent la harceler ;
- (3) Attaque : La dernière étape du mécanisme de chasse consiste à attaquer la proie. Après l'encerclement, les loups se rapprochent de la proie, l'encerclent encore et finissent par la finir.

Ces étapes sont présentées dans la figure IV.6

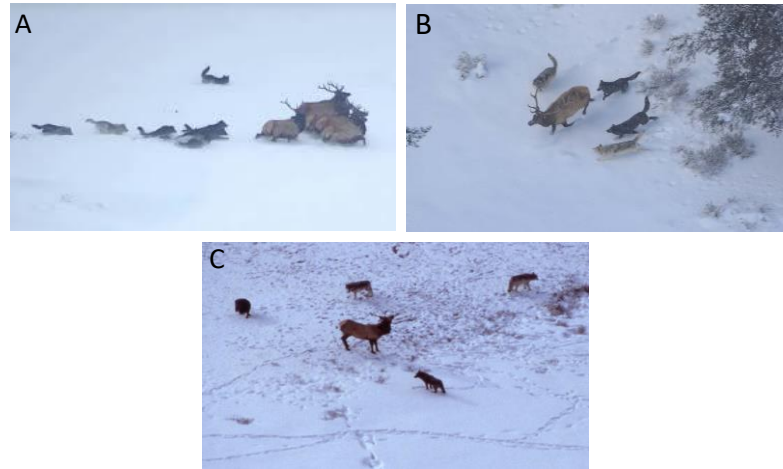


Figure IV. 7: Performance de chasse du loup gris : (A) suivre, approcher la proie (B) encercler et harceler (C) l'attaque.

IV.4.1 Modélisation et application du GWO sur contrôleur mode glissant

S. Mirjalili et al. proposent l'algorithme d'optimisation de Grey Wolf (GWO) en 2014 [93] pour les problèmes à objectif unique. Dans cette section, les modèles mathématiques de la hiérarchie sociale, de la poursuite, de l'encerclement et de l'attaque des proies sont fournis. Puis le L'algorithme GWO est décrit

- **Hierarchie sociale**

Les auteurs ont proposé un modèle qui indique que la solution la plus appropriée pour un problème donné doit être nommée alpha (α). Les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions sont appelées bêta (β) et delta (δ), respectivement. Le reste de la population est collectivement appelé les loups oméga (ω). La meute est dirigée par α , β , δ et les loups ω les suivront. En fait, au cours du processus d'évolution, la mise à jour des loups est faite de telle manière qu'ils suivent les positions des trois noms de loups les plus adaptés- α , β , et δ .

- **Encercler la proie**

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris encerclent leurs proies pendant la chasse.

Afin de modéliser mathématiquement le comportement d'encerclement, les équations suivantes sont proposées [93].

$$\begin{cases} \vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{pi} - \vec{X}_i| \\ \vec{X}_{t+1} = \vec{X}_{pi} - \vec{A} \cdot \vec{D} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

Où t indique l'itération actuelle, \vec{A} et \vec{C} sont des vecteurs de coefficients, \vec{X}_{pi} est le vecteur de position de la proie et \vec{X}_i indique le vecteur de position d'un loup gris [95].

Les vecteurs \vec{A} et \vec{C} sont calculés comme suit

$$\begin{cases} \vec{a} = 2 - 2 \times t / \max_{iter} \\ \vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \\ \vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \end{cases} \quad (IV.6)$$

Pour confirmer l'effet de l'équation (IV.6), un vecteur de position bidimensionnel et quelques voisinages possibles sont présentés à la figure 4.7. Comme vous pouvez le voir sur cette figure, un loup gris à la position (X, Y) peut mettre à jour sa position en fonction de la position de sa proie (X*, Y*). En ajustant les valeurs des vecteurs \vec{A} et \vec{C} , nous pouvons atteindre différents emplacements autour du meilleur agent par rapport à la position actuelle. Par exemple, (X* - X, Y*) peut être obtenu en posant $\vec{A} = (1.0)$ et $\vec{C} = (1.1)$. Notez que les vecteurs aléatoires \vec{r}_1 et \vec{r}_2 permettent au loup d'atteindre n'importe quelle position entre les points représentés sur la Figure IV.7. Les loups gris peuvent donc utiliser des équations aléatoires pour mettre à jour leur position dans l'espace autour de leur proie (IV.6). Les trois premières meilleures solutions sont enregistrées et les autres agents sont obligés de mettre à jour leur position en fonction de la meilleure position de l'agent de recherche, comme indiqué dans la formule suivante [96,97] :

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_{\alpha i} - \vec{X}_i| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_{\beta i} - \vec{X}_i| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_{\delta i} - \vec{X}_i| \end{cases} \quad (IV.7)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_{\alpha i} - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_{\beta i} - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_{\delta i} - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{cases} \quad (IV.8)$$

$$\vec{X}_{i+1} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (IV.9)$$

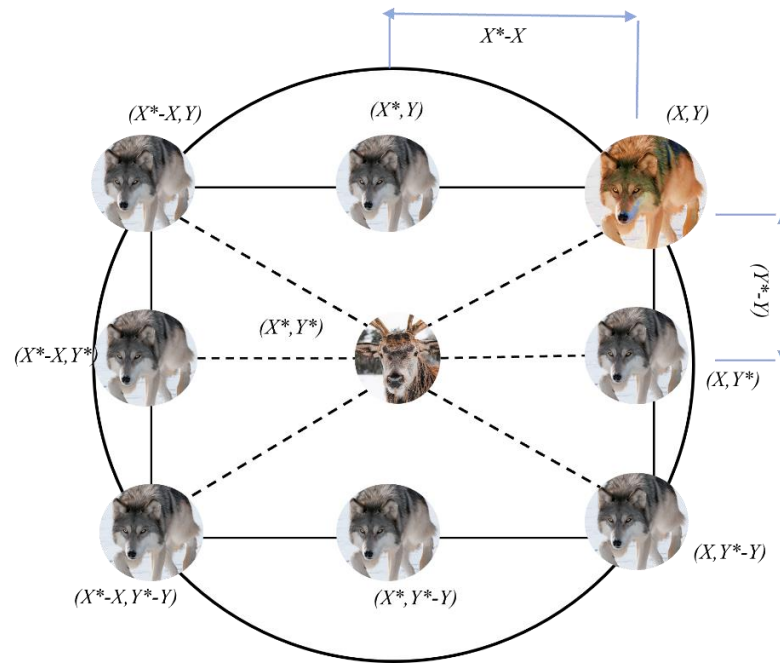


Figure IV. 8: vecteurs de position et leurs prochains emplacements possibles.

La figure IV.7 montre comment un agent de recherche met à jour sa position en fonction de alpha, bêta et delta dans un espace de recherche 2D. On peut observer que la position finale serait dans un endroit aléatoire à l'intérieur d'un cercle qui est défini par les positions de alpha, beta et delta dans la recherche espace. En d'autres termes, alpha, bêta et delta estiment la position de la proie, et d'autres loups mettent à jour leurs positions au hasard autour de la proie

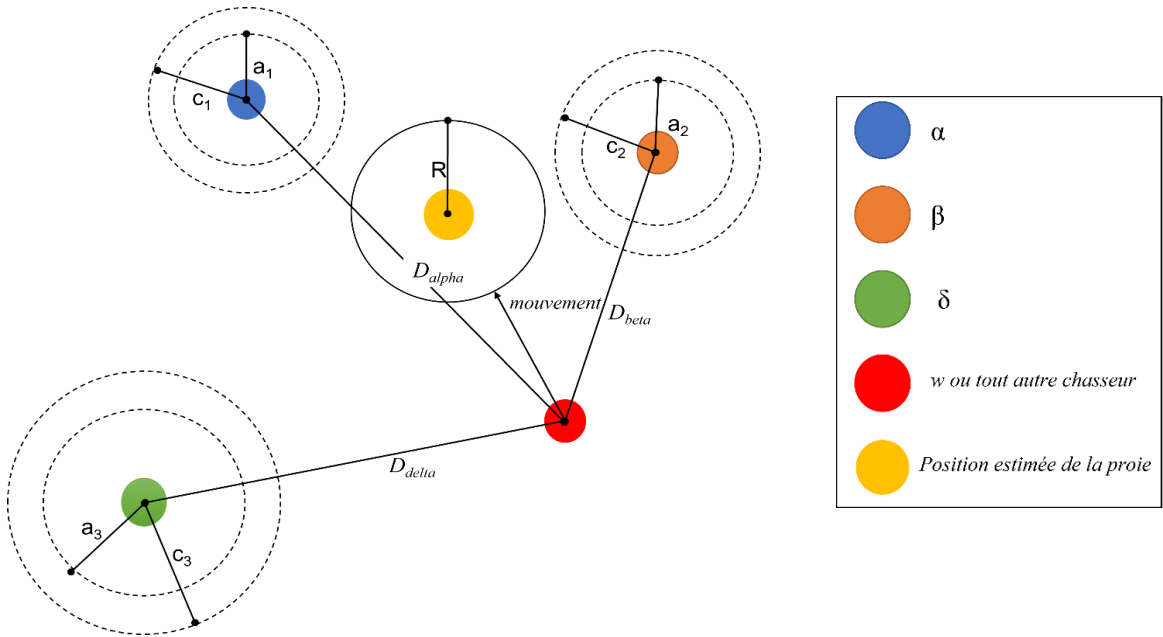


Figure IV. 9: Mise à jour de position dans GWO.

- **Attaquer la proie**

Comme mentionné précédemment, les loups gris terminent leur processus de chasse en attaquant la proie jusqu'à ce qu'elle soit immobilisée. Pour modéliser le processus d'attaque, le paramètre \vec{a} , décroît régulièrement de 2 à 0 entre $t = 1$ et $t = T$: $\vec{a} = 2(1-t/T)$. Les activités de chasse est généralement guidée par l'alpha. Beta et Delta peuvent occasionnellement participer à la chasse. Un modèle mathématique du comportement de chasse du loup gris supposait que l'alpha, le bêta et le delta connaissent les proies potentielles. Pendant la chasse, la phase de recherche court jusqu'à ce que la condition $|A| \geq 1$ soit respectée : les loups sont forcés à s'éloigner les uns des autres figure IV.9.a. Ensuite commence la phase d'exploitation, dès que $|A| < 1$: les loups sont alors forcés d'attaquer la proie Figure IV.9.b. Par conséquent, un paramètre clé pour équilibrer les phases d'exploration et d'exploitation est le paramètre a. La recherche globale s'arrête à $a = 1$. Commence alors la recherche locale, jusqu'à $a = 0$

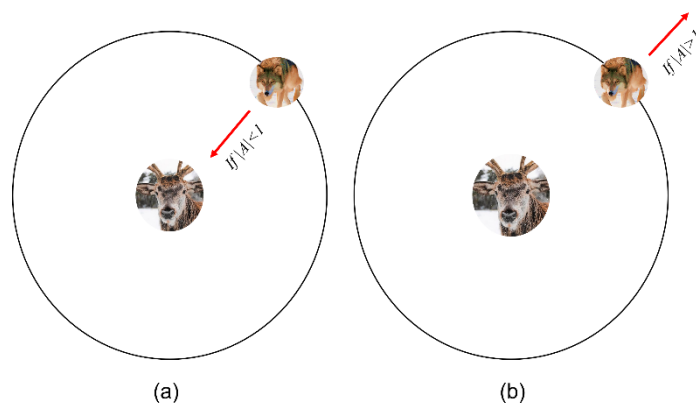


Figure IV. 10: Attaquer une proie contre chercher une proie.

- **La recherche de la proie (exploration)**

Les loups recherchent souvent des proies en fonction des positions de α , β et δ . Ils s'écartent les uns des autres pour repérer l'emplacement de leur proie et convergent pour l'attaquer. Pour modéliser mathématiquement la divergence des loups gris, \vec{A} peut être utilisé. \vec{A} est un vecteur aléatoire supérieur à 1 ou inférieur à -1 qui oblige l'agent de recherche à s'écartier de sa proie, mettant l'accent sur la recherche globale dans GWO Figure IV.9.

IV.5 Résultat de simulations

Les stratégies de contrôle proposées pour la chaîne d'éolienne basée sur la GSAP ont été réalisées dans le logiciel MATLAB/SIMULINK et des simulations détaillées ont été réalisées

pour la vitesse réelle du vent de la région d'Adrar. Les paramètres de la génératrice et la turbine indiqués dans l'annexe A et B.

IV.5.1 Données de vent et analyse de site

Adrar est situé au sud de l'Algérie (Lat 27°49' N et Long 00°17' E). L'emplacement se caractérise par son potentiel simultané et sa moindre rugosité. Les informations utilisées dans cette tâche ont été extraites de la station New Energy Algeria (NEAL) de l'Unité de Recherche Energétique Adrar (URER-MS) [98].



Figure IV. 11: Site géographique d'Adrar.



Figure IV. 12: Station NEAL installée à l'URERMS Adrar.

Les données de la vitesse du vent collectées en 2019 avec une période de collecte journalière sont représentées sur la figure IV.12.

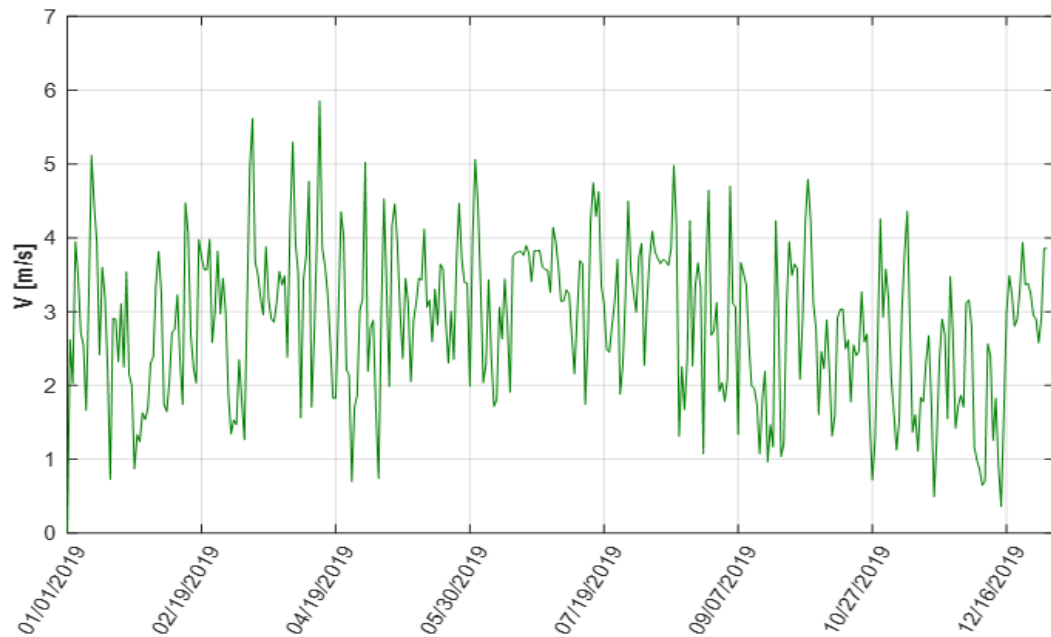
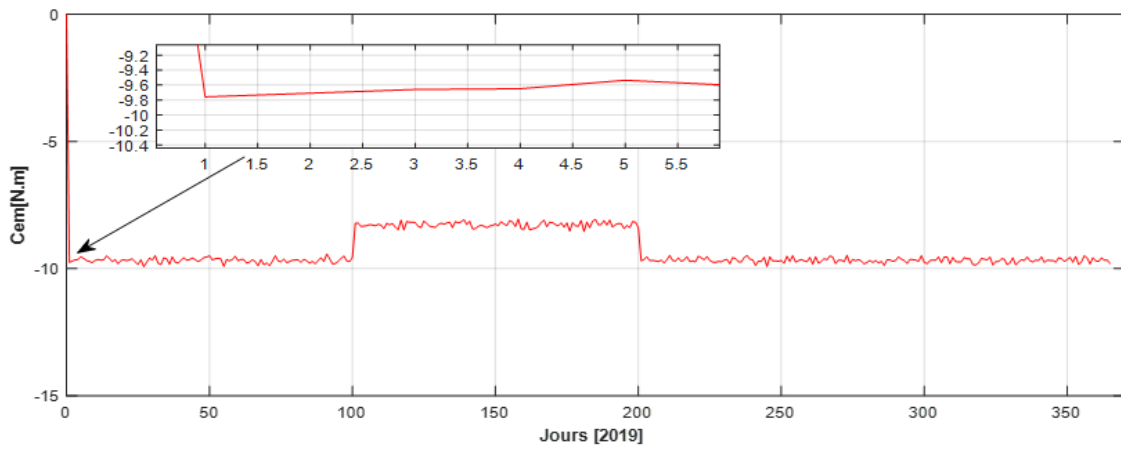


Figure IV. 13: Vitesse du vent réel.

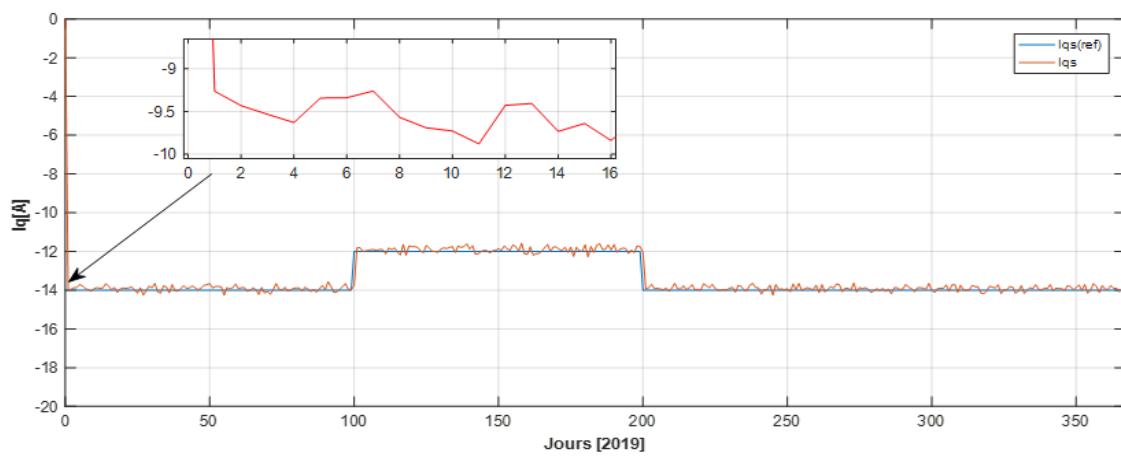
IV.5.2 La méthode d'optimisation

Les gains de la commande mode glissant choisis ont un impact considérable sur les performances du contrôleur. Pour une valeur de gain significative, le contrôleur subira de fortes vibrations, provoquant une contrainte sur le mécanisme de roulement du système et entraînant peut-être l'état du système dans une dynamique instable. Dans cette étude, les algorithmes PSO et GWO sont appliqués pour sélectionner les paramètres optimaux du contrôleur SMC K_q et K_d (quadrature et constantes directes) pour obtenir le suivi de trajectoire requis et améliorer les performances globales du système.

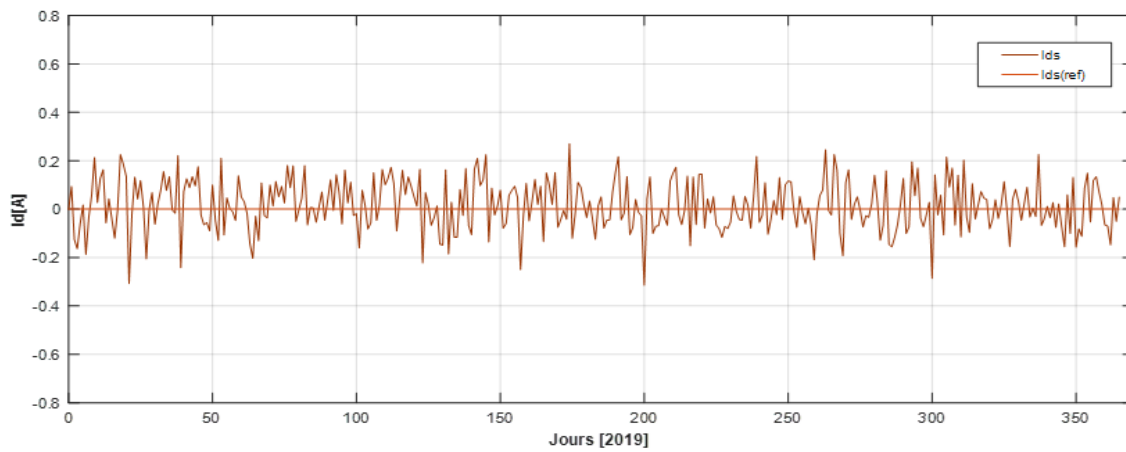
Les paramètres de PSO et GWO utilisés pour trouver les valeurs optimales des paramètres sont définis dans l'annexe C.



(a) Couple électromagnétique.

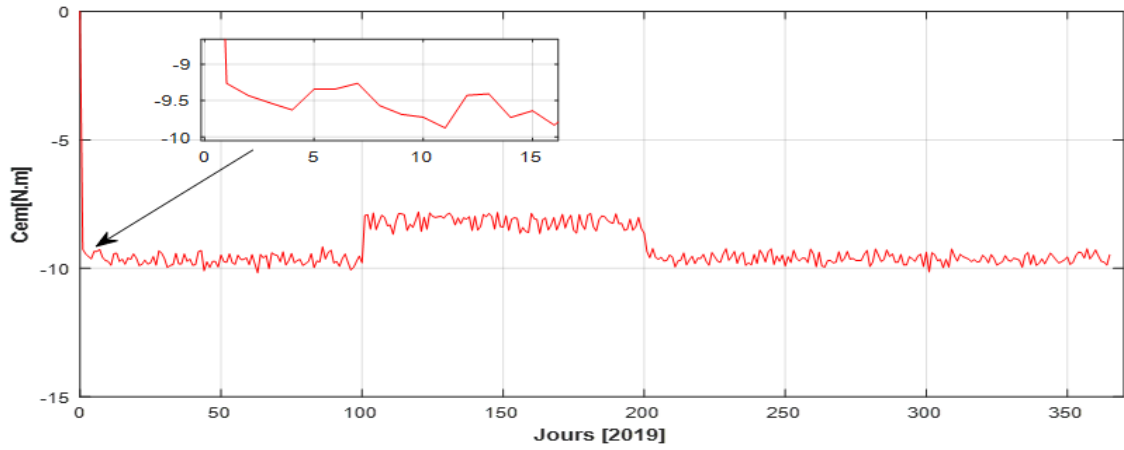


(b) Courant I_q .

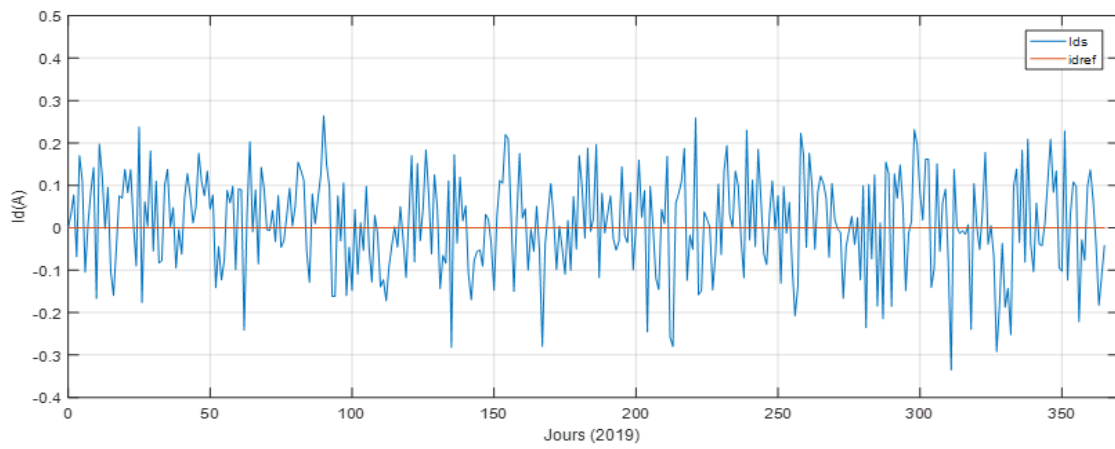


(c) Courant I_d .

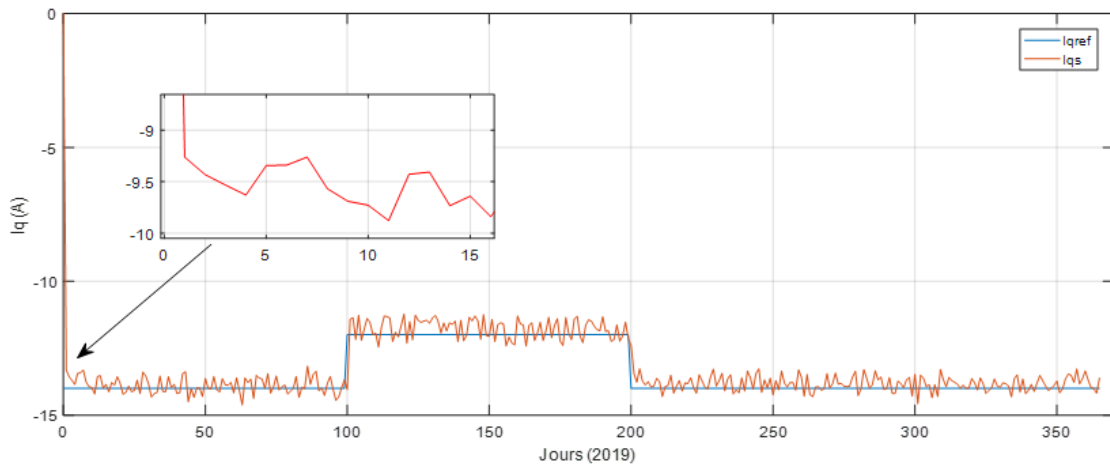
Figure IV. 14: Résultat de simulation PSO-SMC.



(a) Couple électromagnétique.



(b) Courant Id.



(c) Courant Iq.

Figure IV. 15: Résultat de simulation GWO-SMC.

La plupart des algorithmes d'optimisation intelligents ont souvent des critères de performance tels que l'erreur Intégré Absolu (Integrated Absolute Error (IAE)), l'erreur carrée intégrée (Integrated of Square Error (ISE)), Intégré de Time Square Error(Integrated of Time Square Error (ITSE)) et erreur absolue de temps intégral(integral time absolute error(ITAE)). Ceci peut être évalué analytiquement dans le domaine fréquentiel. Ces critères de performance comprennent le dépassement, le temps de montée, le temps de stabilisation et l'erreur en régime permanent. De plus, l'optimisation et la robustesse du système d'entraînement ont été spécifiées. La formule de calcul des critères de performance est la suivante [99,100]

$$\text{Integral Square Error}(ISE) = \int_0^{\infty} e^2(t) . dt$$

$$\text{Integral Absolute Error}(IAE) = \int_0^{\infty} |e^2(t)| . dt$$

$$\text{Integral Time Square Error}(ITSE) = \int_0^{\infty} t . e^2(t) . dt$$

$$\text{Integral Time Absolute Error}(ITAE) = \int_0^{\infty} t . |e^2(t)| . dt$$

La fonction objective utilisée dans les simulations est l'erreur carrée intégrée (ISE) ; l'intervalle de recherche des paramètres de gains est au cours de l'année 2019 et le temps de simulation est compris entre [0 et 365] jours.

La Fig. IV. 13 (a) représente le couple électromagnétique et montre que le couple est l'image de courant I_q , il a une valeur de -10 entre 0 et 100 et entre 200 et 365 et une valeur de -7 entre 100 et 200. La figure Fig. IV. 13 (b) représente le courant quadrature, il est négatif ce qui montre que la machine produit l'électricité, c'est logique, il est en mode générateur.

Le courant I_q est bien suivi sa référence avec petit oscillation due aux commutations des interrupteurs de l'onduleur. Le courant direct I_d est illustré dans la Fig IV. 13 (c), il est oscillé autour de sa référence qui égale à zéro, cette référence a été choisi pour obtenir un facteur de puissance unitaire.

On observe une dynamique qui réagit rapidement, les échelons courants sont bien suivis.

Dans le cas de l'optimisation GWO, la Fig IV.14 (a) donne le Cem De plus Fig IV. 14 (b) représente le courant I_d , la Fig IV. 14 (c) représente le courant I_q on observe aussi dans le cas de GWO, une dynamique qui réagit rapidement, et une bien suivis des references.

D'après les résultats de la simulation les courbes générées à l'aide de PSO fonctionnent bien mieux que la méthode proposée GWO, pendant la variation de la vitesse du vent avec une convergence plus rapide et une solution optimale à réduire l'effet de broutement dans la composante à haute fréquence provoquée par le contrôle par mode glissant tout en limitant les ondulations du couple électromagnétique et courants statoriques. On peut voir sur les figures IV. 13 et IV. 16 que les deux méthodes d'optimisation proposée montrent une efficacité de suivre rapidement de la référence de courant et en termes de vitesse optimale.

Afin de souligner l'optimisation la plus performante, on a dressé un tableau de comparaison du performances du GSAP variant en fonction des gains du contrôleur SMC (K_d, K_q) et ils sont déterminées par la valeur d'ISE, ITSE, IAE, ITAE, comme indiqué dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 Analyse statique.

<i>Parameters</i>	K_q	K_d	<i>ISE</i>	<i>ITSE</i>	<i>IAE</i>	<i>ITAE</i>
<i>SMC-</i> <i>manually</i>	-800	-800	0.01498	0.009513	0.01498	0.009513
<i>SMC-PSO</i>	-1098e+03	-855.1739	0.01352	0.005081	0.01363	0.005177
<i>SMC-GWO</i>	-679.784	-400	0.02454	0.006819	0.03051	0.008760

Le tableau IV.2 montre les performances des deux optimisations. Sur la base de ces résultats, les tailles d'erreur obtenues pour différents critères dans GWO sont importantes par rapport à l'algorithme PSO proposé.

De plus, les courants de stator dans GWO ont un THD élevé (THD = 3,60 %) par rapport aux courants de stator dans PSO (THD = 1,00 %) Figure IV.15 et figure IV.16.

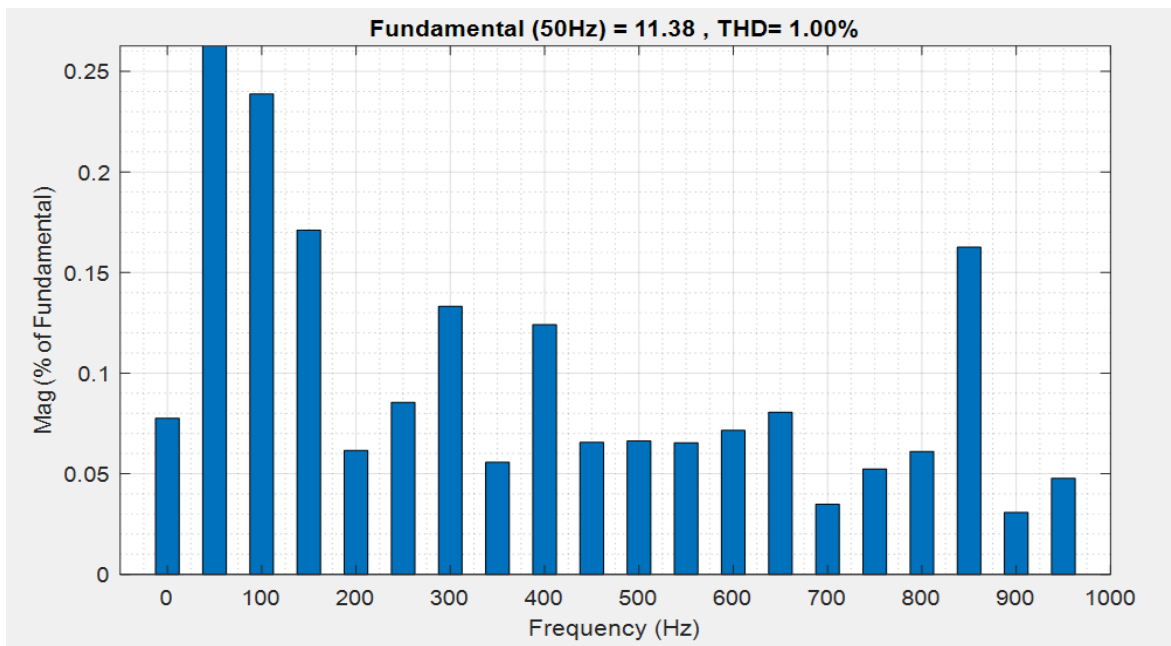


Figure IV. 17: Le spectre des harmoniques d'étage de courant du stator avec PSO-SMC.

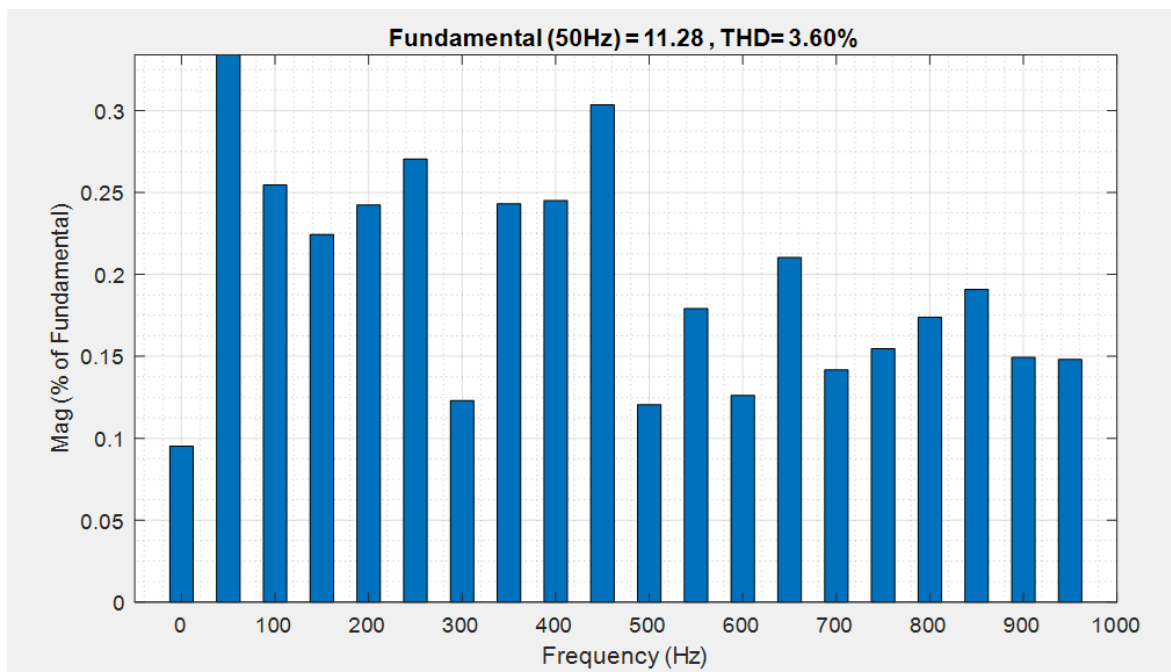


Figure IV. 18: Le spectre des harmoniques d'étage de courant du stator avec GWO-SMC.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les deux algorithmes d'optimisation essaim particulière (PSO) et loup gris (GWO) comme des nouveaux algorithmes méta-heuristiques pour trouver les paramètres optimaux (K_d, K_q) du contrôleur par mode glissant appliqué à une génératrice synchrone à aimant permanent utilisé dans un système de conversion d'énergie éolienne. L'algorithme PSO s'inspire du comportement social des animaux qui vivent en essaim, et le GWO s'inspire du style de vie des loups gris. De plus, ce chapitre présente une brève revue de la littérature sur les méta-heuristiques, et décrit les équations mathématiques de PSO et GWO.

L'algorithme PSO spécifie un facteur de performance minimum pour diverses normes d'erreur (ISE, ITSE, IAE, ITAE) pour les erreurs d'entrée du contrôleur SMC et un THD minimum par rapport à GWO.

Les résultats de simulation obtenus par MATLAB/SIMULINK montrent la rapidité de réponse et la robustesse du système. De plus, l'algorithme PSO est plus efficace que l'algorithme GWO.

Conclusion générale

Des améliorations dans la conception et le fonctionnement de système d'énergie éolienne est toujours nécessaires afin de rendre le système plus compétitif pour la production d'énergie électrique. Dans ce contexte l'objectif principal de ce travail de recherche présenté dans cette thèse est une étude et dimensionnement dédiées à l'optimisation de la conversion d'énergie éolienne a vitesse variable basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent.

En premier chapitre nous avons présenté, un état de l'art sur la production de l'énergie éolienne en Algérie, une définition de l'énergie éolienne, les types d'aérogénérateurs existants, les deux types d'éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable ainsi que les différentes configurations des systèmes de conversion d'énergie éolienne. Dans un second lieu, nous avons exposé les différentes configurations de chaine éolienne (générateur asynchrone-synchrone) le choix a été porté sur une turbine éolienne à attaque direct basé sur un générateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties : dans la première partie couvrait le principe de fonctionnement et la constitution générale des éoliennes, ainsi que la modélisation et le dimensionnement d'une turbine éolienne pour lequel la maximisation de l'énergie récoltée par le vent est effectuée. Les résultats obtenus montrent un bon comportement du système. Dans la deuxième partie nous avons établi, la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) des équations électriques, magnétiques et mécanique régissant la GSAP ont été donné dans le repère (abc) et le repère de Park. La GSAP a été exécuté sur une alimentation composée d'un onduleur avec contrôle MLI (Sinus-Triangle) pour visualiser son comportement. Les résultats sont obtenus avec un bon suivi des références qui changent en fonction du profil de vent.

Dans le troisième chapitre pour améliorer le contrôle GSAP, nous avons appliqué la commande par mode glissant qui représente un cas particulier de la commande à structure variable. Les résultats obtenus sont intéressants du point de vue robustesse et qualité de l'énergie produite vis-à-vis des variations brusques de la vitesse du vent, ainsi qu'un bon comportement obtenu face aux perturbations et aux variations paramétriques (résistance statorique). La commande par mode glissant présente plusieurs avantages tel que, robustesse, simplicité, temps de réponse très rapide. Notez cependant que de fortes vibrations dans l'unité de commande peuvent modifier les performances du système. Ce phénomène s'appelle le broutage (Chattering). Ce problème a été étudié pour trouver une solution. Pour résoudre ce problème, nous utilisons une optimisation.

Dans le quatrième chapitre afin d'améliorer les performances de la commande de système nous avons utilisé les algorithmes méta-heuristiques (PSO et GWO) Pour atteindre les gains et les paramètres optimaux du contrôleur mode glissant qui permis de réduire grandement les oscillations dues au phénomène de chattering, et a montré sa robustesse vis-à-vis le bon suivi de référence et des perturbations du vent. Les résultats de simulation ont montré une efficacité de ces approches pour les applications de l'énergie éolienne.

Les résultats de simulation pour des vitesses de vent réelles (région d'Adrar) permettent de considérer les objectifs fixés par ces stratégies de contrôle. A cet effet, il est possible de tester la validité de l'algorithme d'optimisation du courant sur les courbes du couple électromagnétique et de la vitesse maintenue à la valeur optimale en régime établi et en régime critique Observer l'effet de la vitesse du vent sur le courant, la tension , devient plus important avec l'augmentation de la vitesse du vent

De nombreuses voies d'amélioration de nos structures sont envisageables, citons par exemple :

- Utilisation des générateurs à synchrone GSAP plus puissant (>1MW).
- Appliquer la commande mode glissant flou.
- L'utilisation de l'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones pour la commande de la GSAP.
- La validation de l'algorithme de commande proposé sur un banc expérimental ;
- La conception d'une loi de commande par mode glissant pour la régulation de puissance capturée dans le même cadre.

Bibliographies

- [1] M. Makhad, M. Zazi, A. Loulijat and A.O.Simon, « Robust Integral Back stepping control for Optimal Power Extraction of a PMSG-based Variable Speed Wind Turbines », 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), 14 May 2020, DOI: 10.1109/IRASET48871.2020.9092053.
- [2] Global Wind Report 2022- <https://gwec.net/global-wind-report-2022/> Consulté le 09/11/2022.
- [3] M. Guezgouz, J. Jurasz, M. Chouai, H. Bloomfield, and B. Bekkouche, « Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria », *Energy Conversion and Management* 238 (2021)114170.
- [4] S. Diaf and G.Notton , « Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in southern Algeria», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013) 379-390.
- [5] EnR: 567 MW de capacité totale installée au niveau national à fin 2021-rapport de Algérie presse service public le 04 September 2022.
- [6] S. M. Boudia, A. Benmansour, N. Ghellai, M. Benmedjahed , and M. A. T. Hellal, « Temporal assessment of wind energy resource at four locations in Algerian Sahara », *Energy Conversion and Management* 76(2013) 654-664.
- [7] A. Alhejji and Y. Bouzid, « Robust Adaptive PI Controller of Low Voltage Ride Through for PMSG-Based Wind Turbine», 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'19) | Paris, France / April 23-26, 2019.
- [8] A. Golshani, M. Alizadeh, and S. M. T. Bathaee, « Design of optimized sliding mode control to improve the dynamic behavior of PMSG wind turbine with NPC back-to-back converter», *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, January 2013.
- [9] S. Heshmatian, A. Kazemi, M. Khosravi and D.A. Khaburi, « Fuzzy Logic Based MPPT for a Wind Energy Conversion System Using Sliding Mode Control », 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2017) 14- 16 Feb. 2017, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- [10] S. Bellarbi, D. Saheb Koussa, and A. Djoudi, « Sliding Mode Control for PMSG-based Wind Power System », *Physics* 1081 (2018), 012012.
- [11] L. Hua, F. Xue, Z. Qinc, J. Shid, W. Qiaod, W. Yangd, and T. Yang, « Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system », *Applied Energy* 248(2017), 567-575.
- [12] R. Moutchou and A. Abbou, « Comparative Study of SMC and PI Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Decoupled by Singular Perturbations», 978-1-7281-5152-6/19/\$31.00 ©2019 IEEE.
- [13] Y. Errami, A. Obbadi, and S. Sahnoun, «MPPT Control for Grid Connected Wind Energy Conversion System Based Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) and Five-Level Neutral Point Clamped Converter », *Materials Science and Engineering conference* 765 (2020) 012042 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/765/1/012042.
- [14] R. Suchithra, K. Ezhilsabareesh, and A. Samad, « Optimization based higher order sliding mode controller for efficiency improvement of a wave energy converter », *Energy* 187 (2019) 116111.

- [15] Les énergies renouvelables comme indicateur de performance de toute activité économique-REN21 ; Communiqué de Presse- Sous embargo jusqu'au 15 JUIN – 00h05 CEST Heure de Paris.
- [16] Renewable Energy Data In Perspective- Renewables 2022 Global Status Report- Ren21.
- [17] H. Daaou Nedjari, S.Kheder Haddouche, A.Balehouane, O.Guerri ; « Optimal windy sites in Algeria» ,potential and perspectives Energy in press ; 2018.
- [18] R.V. Van Haaren, V. Fthenakis, «GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA) Evaluating the case for New York State». Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, V15, pp. 3332–3340.
- [19] N.M. Kasbadji, “Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ” ; Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [20] S. Ouali , A. Khellaf et K. Baddari, “Etude géothermique du Sud de l’Algérie”, Centre de Développement des Energies Renouvelables et Laboratoire de Physique de la Terre, Université de Boumerdès, 2006.
- [21] S. MASSOUM , « Contrôle avec les techniques de l’intelligence artificielle d’une source d’énergie éolienne à base d’une machine asynchrone à double alimentation » , Thèse de Doctorat. Université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES,2018.
- [22] Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 2011 Centre de Développement des Energies Renouvelables Ministère de l’Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique page 1 a 4.
- [23] N.KASBADJI MERZOUK ;M. MERZOUK « PERSPECTIVES DU POMPAGE EOLIEN EN ALGERIE » ; Projet National de recherche, domicilié au CDER.
- [24] Bulletin des Energies Renouvelables -L’énergie éolienne- Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie 2022.
- [25] S.BELAKEHAL , « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » ; Thèse de Doctorat. UNIVERSITE DE CONSTANTINE,2010.
- [26] world wind energy association,Half-year Report 2022: Worldwide Windpower Boom Continues in 2022,November 15, 2022 Press Releases, Statistics.
- [27] Y. DJERIRI, « Commande directe du couple et des puissances d’une MADA associée à un système éolien par les techniques de l’intelligence artificielle » , Thèse de Doctorat. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES,2015.
- [28] L. KHETTACHE, « Contribution à l’amélioration des performances d’une chaîne énergétique éolienne » , Thèse de Doctorat. Université Mohamed Khider - Biskra.
- [29] T. DOUADI, « Modélisation et stratégie de Commande de la Génératrice Asynchrone intégrée à un Système Eolien » , Thèse de Doctorat. Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd,2019.
- [30] M. TRAORÉ,« DÉVELOPPEMENT D’UN SIMULATEUR NUMÉRIQUE DE ROTORS D’ÉOLIENNES Application à une chaîne de conversion éolienne utilisant une machine synchrone à aimants permanents » , Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l’obtention du grade de maître en

- sciences appliquées (M.Sc.A.), Université du Québec, 2016.
- [31] I. Martinez, J. Anduea, J.L. Martina, P. Villateb, H. Camblong, “Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation”, *Renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 11, no. 08, pp. 1858-1872, 2007.
 - [32] C.Said, « Contribution à l’optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d’énergie éolienne », Thèse de Doctorat. Université Larbi Ben M’hidi-Oum El Bouaghi, 2017.
 - [33] S. El Aimani, “Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,” Thèse de doctorat de l’école centrale de Lille, 06-12-2004.
 - [34] M. Lopez, “ contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée ”; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France, 2007.
 - [35] K. Belgacem, “Optimisation des performances des systèmes énergétiques dans la production d’énergie éolienne à vitesse variable ”; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Février 2014.
 - [36] G. Abad and all, “Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation”; Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. Published by John Wiley & Sons, Inc, 2011.
 - [37] F. Poitiers, “ Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne ”; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Polytechnique de Nantes, France, Décembre 2003.
 - [38] B. Beltran, “Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur ”; Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Juin 2011.
 - [39] A. Ahmidi, “ Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques ” ; Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, Décembre 2010.
 - [40] H. BENSAAADI , « CONTRIBUTION À LA COMMANDE D’UN AÉROGÉNÉRATEUR BASÉ SUR UN GSAP » ; Thèse de Doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2020.
 - [41] K. Malick Cissé « Etat de l’art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides» JUILLET 2018, NANCY, FRANCE.
 - [42] A. Annane, « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » thèse de Magister, Université d’Annaba, 2010.
 - [43] G. P. NYOUMEA, « modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents », Thèse de Doctorat, Univ du Québec, Avril 2018.
 - [44] S. Afsharnia, « Contrôle vectoriel des machines synchrones à aimants permanents : identification des paramètres et minimisation des ondulations de couple » thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Mar 2018.
 - [45] Boumaraf Farid, “Commande d’un Aérogénérateur- Apport des Techniques de l’intelligence Artificielle ”, doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université de

- Batna, 2014.
- [46] A. Mirecki, "Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.
- [47] M.S. MAHGOUN, « Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à la conversion éolienne », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas de Setif 1, 2022.
- [48] A. Dali, S. Abdelmalek, A. Bakdi and M. Bettayeb, « A new robust control scheme: Application for MPP tracking of a PMSG-based variable-speed wind turbine », *Renewable Energy* 172 (2021) 1021-1034.
- [49] A. Bouhedda, « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2011.
- [50] H. Matayoshi, A. M. Howladerb, M. Dattac, and T. Senjyua, « Control strategy of PMSG based wind energy conversion system under strong wind conditions », *Energy for Sustainable Development* 45(2017) 211-218.
- [51] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », *Techniques de l'Ingénieur*, BM 4 640.
- [52] M. Mayouf, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », thèse de magister, Université de Batna, 2008.
- [53] I. Guenoune, « Commandes non linéaires robustes de systèmes éoliens », thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2018.
- [54] B. SABRI, « Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone/asynchrone », Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES - T L E M C E N, 2019.
- [55] A. Sajadi, L. Rosłaniec, M. Klos, P. Biczal, K. Loparo, « An emulator for fixed pitch wind turbine studies », *Renewable Energy* 87 (2016) 391-402.
- [56] D.H. TRAN « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale », thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2010.
- [57] K. Roummani, K. Koussa, F. Ferroudji, F. Meguellati, Y. Bakou, L. Saihi, « A new study of direct-driven wind energy conversion system under variable wind speed », 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2018 IEEE.
- [58] F. Ferroudji, C. Khelifi, F. Meguellati, K. Koussad, « Design and Static Structural Analysis of a 2.5 kW Combined Darrieus-Savonius Wind Turbine », *International Journal of Engineering Research in Africa*, ISSN: 1663-4144, Vol. 30, pp 94-9.
- [59] A. Fezzani, « Commande Robuste de la Machine Synchrone à Aimants Permanents », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [60] H. The Nguyena, A.S. Al-Sumaitib, V-P. Vuc, A. Al-Durrab and T. Duc Do, « Optimal power tracking of PMSG based wind energy conversion systems by constrained direct control with fast convergence rates », *Electrical Power and Energy Systems* 118 (2020) 105807.
- [61] M. Yin, G. Li, M. Zhou, C. Zhao, « Modeling of the Wind Turbine with a Permanent

- Magnet Synchronous Generator for Integration» 1-4244-1298-6/07/2007 IEEE.
- [62] A. B. Raju, K. Chatterjee, B. G. Fernandes, « A Simple Maximum Power Point Tracker for Grid connected Variable Speed Wind Energy Conversion System with Reduced Switch Count Power Converters », 0-7803-7754-0/03/\$17.00 ©2003 IEEE.
- [63] K. BEDDEK, « Détection et localisation de défauts d'un système de conversion d'énergie éolienne », these de doctorat, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES,2017.
- [64] K. Roummani, « Contribution à des commandes robustes à des sources d'énergie nouvelle et à leur connexion aux réseaux électriques », thèse de doctorat, USTO,2020.
- [65] A. TAHRI, « Contribution à l'identification et à la commande robuste des génératrices synchrones à aimants permanents associées aux générateurs éoliens », thèse de doctorat, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET,2018.
- [66] I. BAKHTI, « Commande et Diagnostic des Défauts dans les Machines Synchrones à Aimants Permanents », thèse de doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd,2018.
- [67] N. CHERFIA, « Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne », thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine,2018.
- [68] S. BELLARBI, D. KOUSSA, A. DJOUDI, « Sliding Mode Control for PMSG-based Wind Power System », Journal of Physics: Conf. Series 1081,012012,2018.
- [69] F. Boussekra, « La commande non linéaire à régime glissant de la MSAP »,these de magister , Université de BATNA,2011.
- [70] V. Bregeault, « Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants », Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2010.
- [71] M. S. Merzoug, H. Benalla, and L. Louze, « Sliding Mode Control (SMC) Of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) », Energy Procedia, 18 (2012) 43 – 52.
- [72] S-W. Lee and K-H. Chun, « Adaptive Sliding Mode Control for PMSG Wind Turbine Systems », Energies 2019, 12, 595.
- [73] R.Moutchou, A.Abbou, «Comparative Study of SMC and PI Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Decoupled by Singular Perturbations»,2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 27-30 November 2019.
- [74] M.I. HEMMAMI , « Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aiment permanent (MSAP) par l'utilisation de la commande direct du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant », Mémoire de magister de l'université de Mohamed Khider -Biskra, 2012.
- [75] S.E.Rhaili, A.Abbou, S.Marhraoui, R.Moutchou, N.El hichami, «Robust Sliding Mode Control with Five Sliding Surfaces of Five-Phase PMSG Based Variable Speed Wind Energy Conversion System», Intelligent engineering & systems, 2020.
- [76] X-X. Yin, Y-G. Lin, W. Li, H-W. Liu, and Y-J. Gu, « Fuzzy-Logic Sliding-Mode Control Strategy for Extracting Maximum Wind Power », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 4, December, 2015.
- [77] S. KAHLA, « Modélisation et commande d'un système éolien », UNIVERSITE 8 MAI

- 1945 GUELMA,2018.
- [78] V.T. Paschos, « Optimisation combinatoire: concepts fondamentaux ». Hermes science publication,2005.
- [79] A. GABOUR, « Optimisation et Commande d'un système énergétique multi source », thèse de doctorat, Université 20 Août 1955-Skikda,2019.
- [80] I. BOUSSAÏD, « PERFECTIONNEMENT DE MÉTAHEURISTIQUES POUR L'OPTIMISATION CONTINUE », thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE « HOUARI BOUMEDIENE »,2013.
- [81] M. Mitchell, « An Introduction to Genetic Algorithms ». Prentice-Hall,1998.
- [82] O. ABDELKAFI, « Métaheuristiques hybrides distribuées et massivement parallèles »,these de doctorat, Université de Haute-Alsace,2016.
- [83] Y. Jin & J. Branke. Evolutionary optimization in uncertain environments – a survey. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 9(3): 303–317, 2005.
- [84] S. Yang & X. Yao. Population-based incremental learning with associative memory for dynamic environments. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 12(5): 542–562, 2008.
- [85] J. Branke, T. Kaußler, C. Schmidt, & H. Schmeck. A multi-population approach to dynamic optimization problems. In Proceedings of Adaptive Computing in Design and Manufacturing, pp. 299–308, Berlin, Germany, April 2000. Springer
- [86] J. LEPAGNOT, « Conception de métaheuristiques pour l'optimisation dynamique. Application à l'analyse de séquences d'images IRM », thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-EST,2011.
- [87] J. Kennedy & R. C. Eberhart, « Particle swarm optimization ». In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV, pp. 1942–1948, Perth, Australia, November 1995
- [88] L. Hu, F. Xue , Z. Qin , J. Shi, W. Qiao , W. Yang and T. Yang, « Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system », Applied Energy 248 (2019) 567-575.
- [89] Y. Soufi , S. Kahla, and M. Bechouat , « Feedback linearization control based particle swarm optimization for maximum power point tracking of wind turbine equipped by PMSG connected to the grid », Hydrogen energy (2016) 1-6.
- [90] M. Hannachi , O. Elbeji , M. Benhamed ,and L. Sbita, « Optimal tuning of proportional–integral controller using particle swarm optimization algorithm for control of permanent magnet synchronous generator based wind turbine with tip speed ratio for maximum power point tracking »,Wind Engineering 1–13 DOI: 10.1177/0309524X20903745 .
- [91] A. Hebala, O. Hebala, W.A.M. Ghoneim, and H. A. Ashour, « Multi-Objective Particle Swarm Optimization of Wind Turbine Directly Connected PMSG »,978-1-5386-0990-3/17/\$31.00 ©2017 IEEE.
- [92] A. Iqbal, D. Ying, A. Saleem , M. A. Hayat, and M. Mateen, « Proposed particle swarm optimization technique for the wind turbine control system », Measurement and Control 1–9 DOI:10.1177/0020294020902785 .
- [93] S. Mirjalili , S. M. Mirjalili , and A. Lewis, « Grey Wolf Optimizer », Advances in

- Engineering Software 69(2014)46-61.
- [94] K. Ezhilsabareesh, R. Suchithra, and A. Samad, « Performance enhancement of an impulse turbine for OWC using grouped grey wolf optimizer based controller », *Ocean Engineering* 190 (2019)106425.
- [95] A Grey Wolf Optimizer for Optimum Parameters of Multiple PI Controllers of a GridConnected PMSG Driven by Variable Speed Wind Turbine
- [96] S. Kahla, Y. Soufi, M. Sedraoui and M. Bechouat, « Maximum Power Point Tracking of Wind Energy Conversion System Using Multi-objective Grey Wolf Optimization of Fuzzy-Sliding Mode Controller », *Renewable Energy Research* Vol.7, No.2, 2017.
- [97] M. H. Qais, H. M. Hasanien, and S. Alghuwainem, « Augmented Grey Wolf Optimizer for Grid-connected PMSG-based Wind Energy Conversion Systems », *Applied Soft Computing Journal*, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.05.006> .
- [98] K. Roummani, M. Hamouda, B. Mazari, M. Bendjebbar, K. Koussa, F. Ferroudji and A. Necaibia, « A new concept in direct-driven vertical axis wind energy conversion system under real wind speed with robust stator power control », *Renewable Energy* 143 (2019) 478-487.
- [99] Ahmed A. Zaki Diab, S. A. Selim, Basem E. Elnaghi, « Particle Swarm Optimization Based Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive », *Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, 2016 IEEE .
- [100] F. Bekraoui, A. Harrouz, K. Roummani, I. Boussaid ,A. Bekraoui, « PS and GW optimization of variable sliding gains mode control to stabilize a wind energy conversion system under the real wind in Adrar, Algeria », *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, <https://doi.org/10.1515/ijnsns-2022-0237>.

Annexe A

Tableau A. Paramètres de la génératrice synchrone à aimant permanent.

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Nombre de pole</i>	<i>3</i>
<i>R_s(Ω)</i>	<i>1.4</i>
<i>L_d(H)</i>	<i>0.0066</i>
<i>L_q(H)</i>	<i>0.0058</i>
<i>J [Kg.m²]</i>	<i>0.00176</i>
<i>F [N.m⁻¹]</i>	<i>0.00038</i>
<i>Flux(W)</i>	<i>0.1546</i>

Annexe B

Tableau B. Paramètres de la turbine.

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Densité de l'air ρ [Kg.m⁻¹]</i>	<i>1.225</i>
<i>Longueur de pale R [m]</i>	<i>2</i>
<i>Frottement du rotor F [N.m⁻¹]</i>	<i>0.154</i>
<i>Inertie totale J [Kg.m²]</i>	<i>0.21</i>

Annexe C

Tableau C.1 Paramètres de l'optimisation par essaim particulaire (PSO)

<i>Paramètres</i>	<i>valeurs</i>
<i>Taille de l'essaim</i>	<i>10</i>
<i>Nombre maximum d'itérations</i>	<i>10</i>
<i>C₁</i>	<i>1.5</i>
<i>C₂</i>	<i>2.0</i>
<i>Facteur de poids d'inertie</i>	<i>1</i>

Tableau C.2 Paramètres de l'optimisation par loup gris (GWO)

<i>Paramètres</i>	<i>valeurs</i>
<i>Nombre d'agents de recherche</i>	<i>10</i>
<i>Nombre maximum d'itérations</i>	<i>10</i>