

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE électrique



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Commande Électriques

Thème

**Contribution à la commande de la génératrice à
réluctance variable (MRV) par les techniques de
contrôle du courant d'hystérésis (HCC)**

Diriger par:

Dr. Labiod Chouaib

Réaliser par:

Bek Mohamed Lakhdar

Hamada Mohamed Mohcene

2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tous ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

*Nous tiendrons à remercier notre mon encadreur, le Dr. **CHOUAIB LABIOD**, pour le sujet qu'il m'a proposé, ses conseils et sa disponibilité. Je le remercie aussi pour ses encouragements, sa gentillesse et sa sympathie tout au long de l'année ce travail. Nos remerciements vont également à tous les Enseignants de la faculté de technologie de l'université Echahid Hamma Lakhder d'Eloued pour avoir accepté de juger ce travail et nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous avons présenté.*

Enfin, nous remercions tous ceux que nous accompagnés ou que nous ait croisés durent dans ce année.

إهداء

الحمد لله عز وجل علي منه وعونه لإتمام هذا البحث
والصلاة والسلام علي اشرف المرسلين
نبينا محمد وعلي اله وصحبه اجمعين
إلى من علمني النجاح والصبر
إلى من افتقده في مواجهة الصعاب
ولم تمهله الدنيا لأرتوي من حنانه... والدي الحبيب، رحمه الله
إلى من وضعتني على طريق الحياة، وجعلتني رابط الجأش
وراعتني حتى صرت كبيراً... أمي الغالية، حفظها الله
إلى جدتي الحبيبة من أفنت عمرها في نصحي وارشادي اطل الله عمرها
إلى زوجتي ورفيقة الكفاح في مسيرة الحياة
إلى إخوتي وإخواتي؛ من كان لهم بالغ الأثر في حياتي.
إلى عائلتي الكبيرة وإخواني وخالاتي وكل ابنائهم وجميع الأقرباء والأحباب
إلى جميع أساتذتي الكرام؛ ممن لم يتوانوا في مد يد العون لي
إلى أصدقائي، وجميع من وقفوا بجواري وساعدوني بكل ما يملكون
إلى كل زملاء العمل والدراسة
إلى كل من هو عزيز علي
إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل

بك محمد الأخضر

إهداء

وُجد الإنسان على وجه البسيطة، ولم يعيش بمعزل عن باقي البشر
وفي جميع مراحل الحياة، يُوجد أناس يستحقون منا الشُّكر
وأولى الناس بالشُّكر هما الأيوان؛ لما لهما من الفضل ما يبلغ عنان السماء؛
فوجودهما سبب للنجاة والفلاح في الدنيا والآخرة.
إلى زوجتي ورفيقة الكفاح في مسيرة الحياة
إلى جموع الأهل والأصدقاء
إلى زملائي و اصدقائي
لكل من يحبني.
لكل من أحب.
أهديكم هذا العمل

حمداً محمد محسن

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في التحكم في مولد الممانعة المغناطيسية المتغيرة (GRV) لتحقيق أقصى قدر من إنتاج الطاقة باستخدام الجمع بين التحكم في التيار الكهربائي بتقنية HCC وتقنية البحث عن القيمة العظمى للإستطاعة MPPT. بعد معرفة الأنواع والأشكال المختلفة لآلة الممانعة المتغيرة ، نقدم النماذج الرياضية المختلفة التي تعبر عن السلوك الكهرومغناطيسي وكذلك نمذجة الآلة MRV بطريقة العناصر المنتهية (MEF) باستخدام برنامج أنسيس Ansys APDL .

بفضل حساب FEM ، قدمنا النتائج الرسومية والنتائج المميزة لـ MRV 12/8 ، ثم تم إجراء المحاكاة الديناميكية عن طريق تقدير عزم الدوران الكهرومغناطيسي لـ MRV في وضع المولد.

من أجل الوصول الى هدف هذا العمل، تم نمذجة توربينات الرياح ومحاكاتها مع تقنية MPPT. بعد ذلك ، تم تفصيل استراتيجية التحكم HCC الخاصة بـ GRV من خلال توضيح استراتيجيات التحويل الممكنة بواسطة معدل هيستريز والمحول الإلكتروني (الجسر غير المتماثل) وكذلك عن طريق خوارزمية أو مخطط التدفق الذي يسمح بالتحكم في عزم الدوران بواسطة تقنية التحكم HCC. وفي الآخر تم الربط بين تقنية التحكم في عزم الدوران بواسطة HCC مع تقنية MPPT للتوربينة الهوائية من أجل زيادة الكفاءة η_p .

النتائج التي تم الحصول عليها توافق وتؤكد أن كفاءة نظام التحكم المقترح. كما عرضنا أهمية تأثير زوايا التبديل ($\theta_{off}, \theta_{on}$) على أداء التشغيل ونوعية الطاقة المنتجة بواسطة GRV.

الكلمات المفتاحية

- ❖ مولد الممانعة المغناطيسية المتغيرة (GRV)
- ❖ معدل هيستريز
- ❖ توربينه ريحيه
- ❖ MPPT
- ❖ طريقة العناصر المنتهية (MEF)

Résumé

Le but de ce travail est contribution à la commande de la génératrice à reluctance variable (GRV) pour avoir la maximisation de puissance à l'aide de l'association de commande HCC avec la technique MPPT. Après avoir connu les différents types et formes de la machine à réluctance variable, nous vous présentons les différents modèles mathématique qui exprimé le comportement électromagnétique aussi la modélisation de la MRV par la méthode des éléments finis (MEF) à l'aide de logiciel Ansys APDL.

Grâce au calcul FEM nous avons présenté les résultats graphiques et les résultats caractéristiques du MRV 12/8, puis la simulation dynamique a été faite en estimant le couple électromagnétique du MRV en mode génératrice.

Pour l'objet de ce travail, on a fait modélisé et simulé la turbine éolienne avec la technique MPPT. Ensuite, la stratégie de commande HCC de la GRV est détaillées par les stratégies de commutation possibles par régulateur à hystérésis et le convertisseur électronique (pont asymétrique) et l'algorithme ou l'organigramme qui permet de contrôler le couple par la commande HCC. L'association a également été faite entre la technique de contrôle de couple de GRV par HCC avec la technique MPPT de la turbine afin de maximiser le rendement CP.

Les résultats obtenus approuvent et valident l'efficacité du système de contrôle proposé, ils ont également présenté l'importance de l'effet de variation des angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}) sur les performances de fonctionnement et la qualité de l'énergie produite par le GRV.

Mots clefs

- ❖ Génératrice Reluctance Variable (GRV)
- ❖ Régulateur à Hystérésis
- ❖ Turbine éolienne
- ❖ MPPT
- ❖ Méthode des éléments finis

Abstract

The aim of this work is to contribute to the control of the Switched Reluctance Generator (SRG) to have the power maximization using the combination of HCC control with the MPPT technique. After knowing the different types and design of the variable reluctance machine, we present the different mathematical models which expressed the electromagnetic behavior also the modeling of the MRV by the finite element method (FEM) using Ansys APDL software.

Thanks to the FEM calculation we presented the graphical results and characteristic results of MRV 12/8, then dynamic simulation was done by estimating the electromagnetic torque of MRV in generator mode.

For the purpose of this work, the wind turbine was modeled and simulated with the MPPT technique. Then, the HCC control strategy of the GRV is detailed by the possible switching strategies by hysteresis regulator and the electronic converter (asymmetric bridge) and the algorithm or flowchart that allows to control the torque by the HCC control. The HCC with the torque control technique of SRG have also been associated with the turbine MPPT technique in order to maximize the efficiency CP.

The results obtained approve and validate the efficiency of the proposed control system, they also presented the importance of the effect of variation of angles the turn switching on and the turn switching (θ_{on} , θ_{off}) on the operating performance and the quality of the energy produced.

Keywords

- ❖ Switched Reluctance Generator (SRG)
- ❖ Hysteresis Regulator
- ❖ Wind Turbine
- ❖ MPPT
- ❖ Finite Element Method

Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Liste de figures.....	
Liste des Symbols et Abreviations.....	
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralités sur les Machines à Réluctance Variable (MRV)

I.1 Introduction	3
I.2 Différents topologies de MRV.....	3
I.2.1 MRV pures.....	3
I.2.2 MRV vernier.....	5
I.2.3 MRV hybrides.....	5
I.3 Principe de base.....	7
I.4 Conversion d'énergie.....	10
I.5 Domaines d'utilisation des MRV.....	12
I.6 Avantages et inconvénient des MRV.....	12
I.7 Conclusion.....	13

Chapitre II : Analyse de la MRV par la méthode des éléments finis

II.1 Introduction.....	14
II.2 Les équations électromagnétiques.....	14
II.2.1 Les Equations de Maxwell.....	14
II.2.2. Modèle magnétostatique.....	16
II.2.2.1. Modèle magnétostatique scalaire.....	16
II.2.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle.....	17
II.3 Les différentes méthodes de modélisation d'une MRV.....	18

II.3.1 Les méthodes analytiques	18
II.3.2 Les méthodes d'interpolation.....	18
II.3.3 Les méthodes à base de circuit magnétique équivalent.....	18
II.3.4 Les méthodes des éléments finis.....	19
II.4. Résolution numérique par la méthode des éléments finis.....	19
II.4.1 Conditions aux limites.....	19
II.4.2 Méthode des éléments finis (MEF).....	20
II.5 Modélisation électromagnétique de la MRV.....	21
II.5 .1 Paramètres dimensionnels du prototype.....	21
II.5 .2 Construction du circuit magnétique.....	23
II.5.3 Résultats graphiques.....	23
II.5.4 Analyse de caractéristiques électromagnétiques.....	26
II.6 Simulation de la MRV en mode génératrice (GRV).....	28
II.7.Conclusion.....	32

Chapitre III : Commande HCC de la GRV associé à la technique MPPT de la turbine éolienne

III.1. Introduction.....	33
III.2 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie.....	33
III.3 Généralités sur les éoliennes.....	34
III.3.1 Définition d'énergie éolienne.....	34
III.3.2 Définition d'un système éoliennes.....	34
III.3.3 Types des éoliennes.....	35
III.3.3.1 Eoliennes à axe vertical.....	35
III.3.3.2 Eoliennes à axe Horizontal.....	35
III.3.4 Constitution de la Turbine Eolienne.....	36
III.3.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable.....	37
III.3.5.1 Eolienne à vitesse fixe.....	37
III.3.5.2 Eolienne à vitesse variable.....	37
III.4 Modélisation de la Turbine Eolienne.....	38
III.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	38
III.4.2 Modélisation de la turbine.....	38
III.4.3 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	41

III.4.4 Modélisation de l'Arbre Mécanique.....	41
III.4.5 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	42
III.5 Fonctionnement de la Turbine Eolienne.....	43
III.5.1 Zones de fonction d'une turbine éolienne.....	43
III.5.2 Points de MPPT d'une éolienne.....	44
III.5.3 Résultats de Simulation de la turbine éolienne avec MPPT.....	45
III.6 Stratégie de commande HCC de la GRV.....	49
III.6.1 Convertisseur électronique de puissance.....	49
III.6.2 Stratégies de commutation.....	50
III.6.3 Control du couple par la commande HCC.....	51
III.7 Association et simulation de HCC avec MPPT de la turbine éolienne.....	52
III.8 Résultats de simulation de la GRV associé à la technique MPPT	53
III.9 Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	61
Bibliographie.....	

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure. I.1	<i>MRV pure à double saillance.....</i>	4
Figure. I.2	<i>MRV excitée à effet vernier.....</i>	5
Figure. I.3	<i>Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance.....</i>	6
Figure. I.4	<i>MRV hybride à effet vernier.....</i>	6
Figure. I.5	<i>MRV à plots aimantés.....</i>	6
Figure. I.6	<i>Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor.....</i>	8
Figure. I.7	<i>Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor.....</i>	9
Figure. I.8	<i>Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée.....</i>	9
Figure. I.9	<i>Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4.....</i>	10
Figure. I.10	<i>l'énergie W_{em} et co – énergie W'_{em}.....</i>	11

CHAPITRE II

Figure. II.1	<i>La géométrie et la définition des paramètres dimensionnels du prototype.....</i>	22
Figure. II.2	<i>Répartition du maillage sur la machine complète.....</i>	23
Figure. II.3	<i>Densité du courant électrique.....</i>	24
Figure. II.4	<i>Distribution des lignes de flux dans les deux positions extrêmes.....</i>	24
Figure. II.5	<i>Potentiel vecteur magnétique AZ dans les deux positions extrêmes.....</i>	25
Figure. II.6	<i>Répartition de la densité de flux magnétique pour les deux positions extrêmes</i>	25
Figure. II.7	<i>Caractéristique de flux pour différentes niveaux du courant.....</i>	26
Figure. II.8	<i>Courbes de l'inductance en fonction de θ pour différentes niveaux du courant</i>	27
Figure. II.9	<i>Réseau de courbes de couple statique en fonction de la position du rotor pour différentes niveaux du courant.....</i>	27
Figure. II.10	<i>Schéma block de simulation pour GRV 12/8.....</i>	30
Figure. II.11	<i>L'influence des impulsions sur la tension et l'inductance de la machine.....</i>	31
Figure. II.12	<i>Courant électrique des trois phases.....</i>	31
Figure. II.13	<i>Couple électromagnétique généré par chaque phase pour $\theta_{ON} = 22.5^0$ et $\theta_{OFF} 33^0$.....</i>	32

CHAPITRE III

Figure. III.1	Carte annuelle des vitesses du vent à 10m du sol en (m/s)	34
Figure. III.2	Eoliennes à axe vertical et axe horizontal	35
Figure. III.3	Différences parties d'une éolienne	36
Figure. III.4	Tube de courant d'air autour d'une éolienne	39
Figure. III.5	Coefficient de puissance en fonction de λ et β	41
Figure. III.6	Schéma bloc du modèle de la turbine	42
Figure. III.7	Caractéristique puissance d'une éolienne	43
Figure. III.8	Caractéristiques de C_p pour $\beta=2^\circ$	44
Figure. III.9	Schéma bloc de maximisation de la puissance MPPT de la turbine éolienne...	45
Figure. III.10	Simulation du profil de la vitesse du vent	46
Figure. III.11	Simulation du profil de la vitesse du turbine	46
Figure. III.12	Simulation du profil de la vitesse du mécanique	47
Figure. III.13	Simulation du profil de le coefficient de puissance	47
Figure. III.14	Simulation du profil de la puissance de l'aérogénérateur	48
Figure. III.15	Les états possibles de la tension d'alimentation pour une phase de la MRV....	49
Figure. III.16	Contrôle de courant par hystérésis en utilisant une commutation dure et souple et hybride	51
Figure. III.17	Commande HCC en présence de la boucle de contrôle du couple	51
Figure. III.18	Commande HCC de la GRV associé à la technique MPPT de la turbine éolienne	53
Figure. III.19	La vitesse du vent	54
Figure. III.20	La vitesse du mécanique GRV	54
Figure. III.21	Tension d'alimentation et le courant électrique GRV	55
Figure. III.22	Couple référence optimal de MPPT et couple GRV	56
Figure. III.23	Rendement de puissance MPPT pour la turbine associé à la GRV	57
Figure. III.24	Courant contrôlé par le comparateur d'hystérésis des trois phases de GRV 12/8	58
Figure. III.25	Puissance GRV 12/8 & Turbine grâce au contrôle HCC associé à la technique MPPT	59

Liste des Symboles et Abréviations

symboles

s, r	Indices stator et rotor, respectivement
N	Nombre des pôles
N_s	Nombre de dents au niveau de l'armature statorique
N_r	Nombre de dents au niveau de l'armature rotorique
θ_{on}	Angle de commutation de la mise sous tension [°]
θ_{off}	Angle de commutation de la mise hors tension [°]
θ_e	Angle électrique [°]
θ_m	Angle mécanique [°]
θ	position du rotor
i	Courant instantané [A]
U	Tension de la source [V]
ψ	Flux magnétique total [Wb]
ω	Vitesse angulaire [rd/s]
L	Inductance [H]
W_{em}	Énergie
W'_{em}	Co-énergie
T_e	Couple électromanétique [Nm]
$\vec{E}$	Vecteur champ électrique [v/m].
$\vec{B}$	Vecteur induction magnétique [T].
$\vec{H}$	Vecteur Champ magnétique [A/m].
$\vec{D}$	Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m ²].
$\vec{J}_c$	Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m ²]
ϵ	Permittivité électrique [F/m].
μ	Perméabilité magnétique [H/m].
ν	Réductivité magnétique [m/H].
$\vec{\mu}$	Vecteur vitesse des pièces conductrices susceptible de se déplacer [m/s]
σ	Conductivité électrique [s/m]
$\vec{J}_{ex}$	Densité du courant d'excitation (les enroulements d'alimentation) [A/m ²].

$\vec{B}_r$	Vecteur induction magnétique rémanente.
$\vec{A}$	Potentiel vecteur magnétique
ϕ	potentiel scalaire magnétique
$\vec{n}$	Vecteur normal à S
P_S	Puissance de sortie GRV[w]
w	Vitesse mécanique de la génératrice [rad/s]
S	Surface balayée par l'éolienne [m ²]
S_1, S_2	Section d'air respectivement en amont et en aval dans un cylindre[m ²]
Ω_t	La vitesse angulaire de la turbine [rad/s]
ρ	Masse volumique de l'air [kg/m ³]
V_1	Vitesse du vent [m/s]
V_2	Vitesse d'aérodynamique [m/s]
V	Vitesse moyenne du vent [m/s]
R_t	Le rayon des pales de l'éolienne[mm]
C_{em}	Le couple électromagnétique[Nm]
V_{est}	Vitesse du vent en [m/s]
G	Gain du multiplicateur
λ	Rapport de vitesse
β	Angle d'orientation des pales[°]
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine[W]
C_t	Couple aérodynamique de la turbine [Nm]
P_v	Puissance du vent[W]
Ω_{mec}	La vitesse rotation de l'arbre de la génératrice électrique [rad/s]
G	Coefficientmultiplicateur
C_g	Le couple multiplicateur [Nm]
J_{total}	Inertie totale[kg.m ²]
f	Coefficient de frottement visqueux.
C_p	Coefficient de performance
C_{ref}	Couple électromagnétique référence de la turbine [Nm]
I_{ref}	Courant référencede la turbine [A]

Abréviations

MRV	Machine à réluctance variable
RV	RV Réluctance Variable
GRV	Génitrice à réluctance variable
MEF	Méthode des éléments finis
HCC	HysteresisCurrent Control
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Régulateur Proportionnel-Intégral
MRVDS	Machine à réluctance variable à double saillance
RSVX	Résistivité électrique
MUX	Perméabilité relative magnétique

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La consommation intensive des énergies fossiles les a entraîné une raréfaction des ressources aujourd'hui exploitables, tandis que leur combustion pollue l'air et produit des gaz à effet de serre. L'épuisement de certaines ressources et le souci de préserver l'environnement redirigent le monde vers les énergies renouvelables et favorisent l'utilisation des machines électriques tournantes dans ce domaine.

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer.

Les machines électriques sont de divers types et leur constante évolution. Il est possible de citer les machines électriques classiques comme à courant continu, synchrones et asynchrones mais il y a aussi de nouveaux types des machines émergent dans l'industrie comme les moteurs synchrones à aimant permanent et les machines à réluctance variable.

L'objectif de ce mémoire est d'effectuer une étude sur le comportement de la GRV et leur commande dans une large plage de fonctionnement aussi nous allons utiliser la méthode de l'élément fini pour la modélisation de la machine car cette méthode est capable de prédire voire d'optimiser les phénomènes électromagnétiques ainsi que les techniques de contrôle HCC et MPPT pour avoir de meilleures performances opérationnelles. Notre travail sera présenté en trois parties comme suit :

Dans le Chapitre I : Nous présenterons les différents types des machines à réluctance variable selon leurs constructions puis nous procéderons à une étude théorique de leur fonctionnement en association avec leur alimentation.

Dans le Chapitre II : Nous étudions les formulations des différents modèles mathématiques régissant les phénomènes électromagnétiques avec présentations des quelques méthodes numériques d'approximation pour la résolution des problèmes électromagnétiques et traite la modélisation et simulation de la MRV selon une méthode par éléments finis par le logiciel ANSYS. Après avoir déterminé les caractéristiques statiques par MEF du prototype choisi MRV 12/8, nous allons finaliser ce chapitre par

simulation sur Matlab de la MRV en mode génératrice pour bien comprendre le mécanisme de fonctionnement de la GRV.

Dans le Chapitre III: nous allons intéresser essentiellement sur la modélisation de la turbine éolienne et la technique MPPT avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement et la technique de contrôle HCC en présence le contrôle du couple de la GRV, et ce pour faire une association entre lesdites techniques. Ensuite, on va exposer les résultats de simulation de l'association de HCC de GRV et la MPPT de turbine commandée par un régulateur PI et comparateur à hystérésis. Ces résultats seront présentés les performances de cette commande pour différentes vitesses de vent avec la variation des angles de commutations, dans tout ça en utilisant MATLAB/SIMULINK.

En dernier lieu, une conclusion générale sera donnée pour résumer les principaux résultats obtenus et pour définir certaines perspectives quant à une éventuelle continuation de ce travail.

Chapitre I :
Généralités sur Les
Machines à
Réductance Variable
(MRV)

I.1 Introduction

Le principe des machines à réluctance variable (MRV) est basé sur celui de l'électroaimant. En fait, il s'agit de la plus ancienne méthode de conversion électromécanique. Toute machine à réluctance variable est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active (stator) et l'autre passive (rotor). La première comprend un circuit magnétique denté muni de bobinages, la seconde est simplement un circuit ferromagnétique, lui aussi denté, mais sans aucun conducteur ni aimant permanent[1, 2].

La machine à réluctance variable à double saillance (MRVDS) dont les phases sont alimentées en courants unidirectionnels par des convertisseurs à demi-points asymétriques, constitue certainement la solution la plus économique grâce aux matériaux utilisés (tôles fer-silicium et cuivre) et à sa simplicité de fabrication (empilage de tôles, bobines préfabriquées, rotor passif naturellement équilibré...). Ses performances peuvent être comparables à celles des machines à aimants permanents. Elle peut aussi fonctionner à puissance maximale constante. Mais elle produit un couple très pulsateur à haute vitesse et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents [1, 3].

Dans le présent chapitre, nous présenterons les différents types des machines à réluctance variable selon leurs constructions puis nous procéderons à une étude théorique de leur fonctionnement en association avec leur alimentation.

I.2 Différents topologies de MRV

Vu la grande variété de structures de machines à réluctance variable (MRV) existantes, nous allons en faire l'inventaire grâce à la recherche bibliographique effectuée. Nous présenterons par la suite la structure à double saillance choisie (MRVDS) pour notre étude ainsi que les bases théoriques régissant son fonctionnement.

I.2.1 MRV Pures

La MRV dite "pure" a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator "actif" où sont situés les bobinages et un rotor "passif" (sans bobinage ni aimants) qui la distingue des machines synchrones et asynchrones. Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ «pulsé». Les moteurs à réluctance de ce type se satisfont de courants unidirectionnels de forme rectangulaire, ce qui fera la spécificité de

leurs alimentations.

On peut citer divers types (Figure. I.1) de structures à réluctance pure [4] :

- Structures à double denture « simple » (« gosses dents ») et à 2 dents par phase.
- Structures à double denture « simple » (« gosses dents ») et à plus de 2 dents par phase.
- Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où un bobinage excite plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global ».

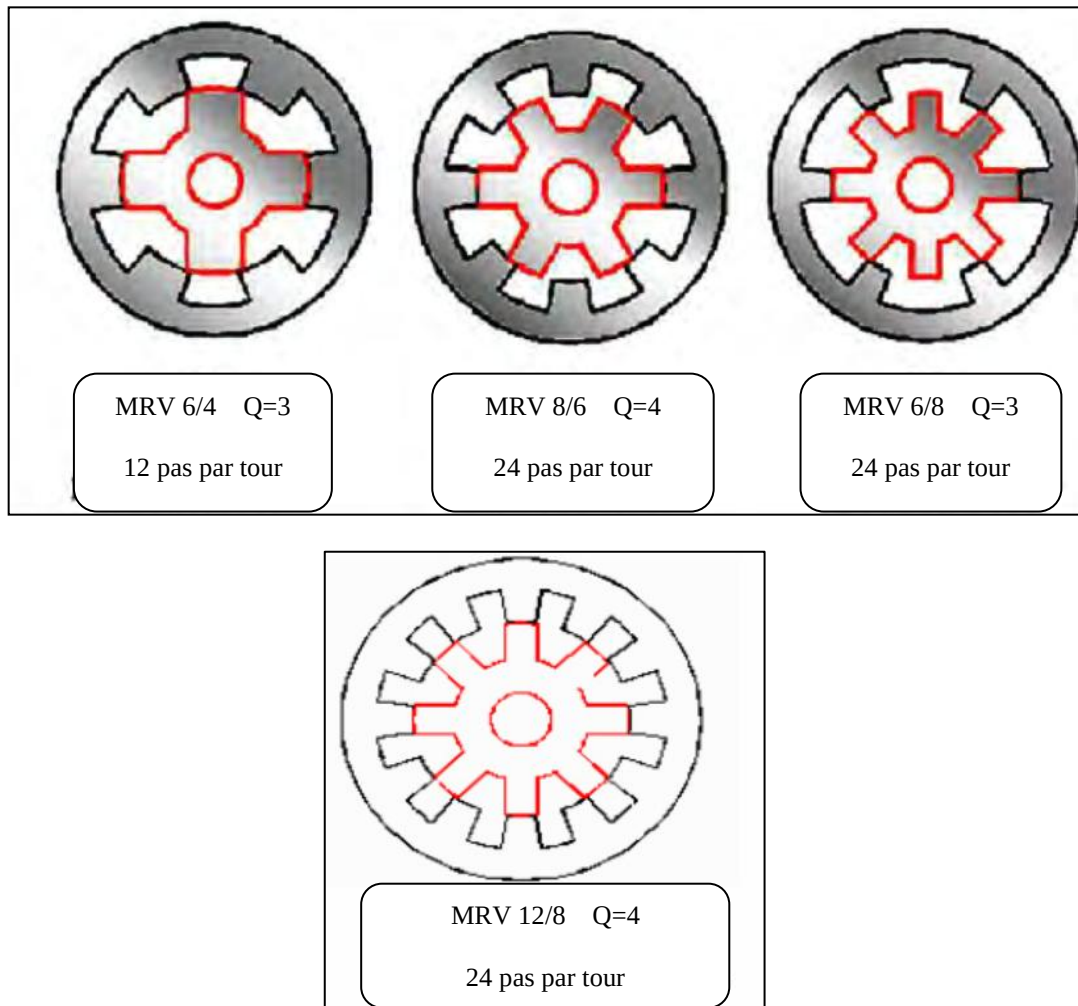


Figure. I.1 :MRV pure à double saillance

Elle se caractérise par un couple massique élevé et une grande simplicité de construction d'où un faible coût et une bonne robustesse. Ces atouts lui ont permis de multiples applications : dans l'industrie pour les systèmes de démarreur-alternateur dans les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'éolien ou l'aérospatial. [5]

I.2.2 MRV Vernier

Certaines machines Vernier ont des structures identiques aux MRV pures sauf qu'elles sont alimentées en courant alternatif sinusoïdal et non en créneaux. On distingue les machines dites « Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes : sur chaque armature, les dents sont identiques et équi-réparties mais les nombres des dents satoriques et rotoriques sont légèrement différents (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse) (Figure. I.2), ce cas illustre une MRV vernier hybride à aimant permanent au rotor ce qui permet d'obtenir une perméabilité sinusoïdale.

On trouve aussi les machines « Vernier à grosses dents » dans lesquelles chaque pôle statorique constitue lui-même la dent. Les nombres de pôles sont alors relativement faibles et les performances couple-vitesse sont comparables à celles des machines asynchrones et synchrones à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines[5][12].

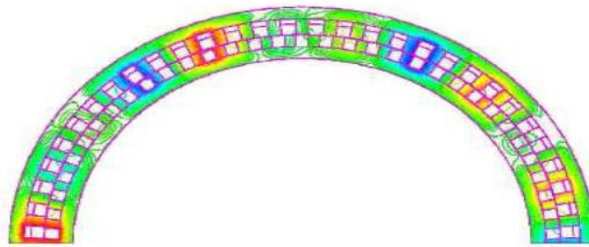


Figure. I.2 : MRV excitée à effet vernier.

I.2.3 MRV Hybrides

Par rapport aux précédentes structures, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances. L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé mais on s'éloigne des structures à réluctance pure. Il est cependant intéressant de signaler deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS : l'une met en œuvre désaimantas placés au rotor [6], la machine se rapprochant des machines synchrones à aimants enterrés (Interior Permanent Magnet) ; la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure aimants placés au stator [7] : on obtient alors une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée » .

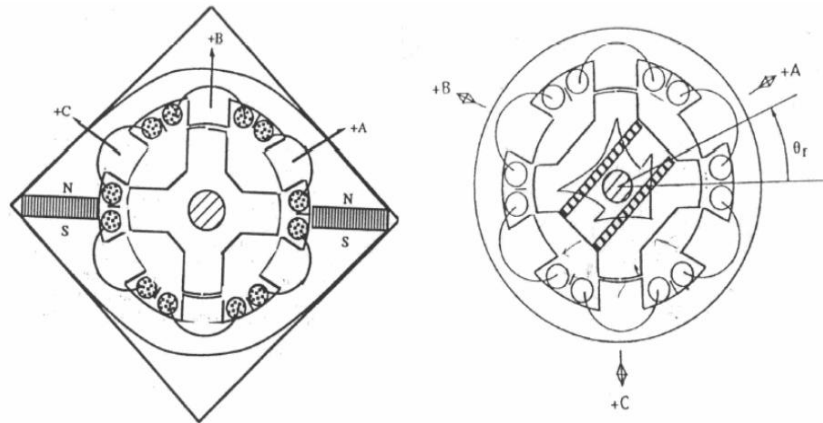


Figure.I.3 : Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance

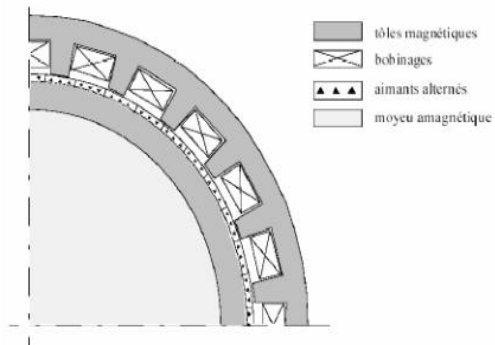


Figure.I.4 : MRV hybride à effet vernier

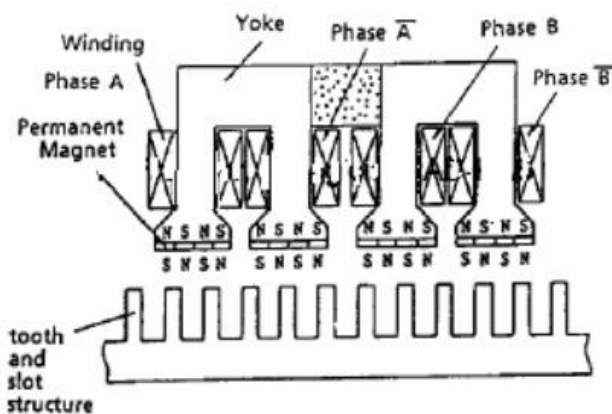


Figure. I.5 : MRV à plots à aimants

I.3 Principe de base

Quel que soit le type de machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, Vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de la structure monophasée élémentaire représentée (Fig. I.5). Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant i et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui inter polaire de la pièce fixe. [4, 1, 10, 9].

Le flux magnétique créé par les ampères-tours (Ni) oscille entre 2 valeurs extrêmes correspondant aux 2 positions [8]:

- une position d'opposition (Figure. I.6.b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale.
- une position de conjonction (Figure. I.6.c) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale.

A partir de la position d'opposition ($\theta_m=0$), pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, nous devrions alimenter l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \pi/2$), selon la règle du « flux max. ou de la réluctance min. », et ainsi de suite .

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (\text{I-1})$$

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est équation (I-1):

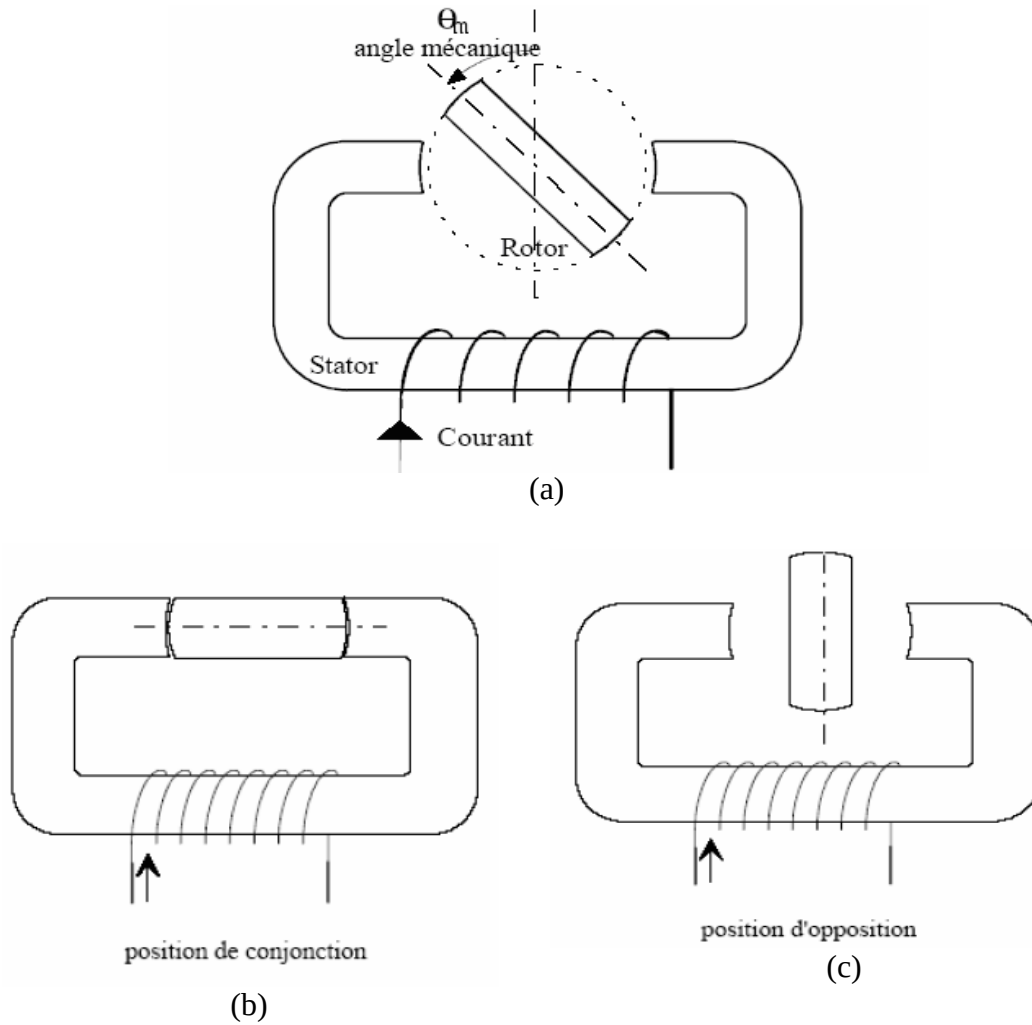


Figure. I.6 :Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor (a)Intermédiaire (b) Conjonction (c) Opposition.

L'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (figure (I.6)) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

- Moteur ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\left(\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} > 0\right)$
- Générateur ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\left(\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} < 0\right)$

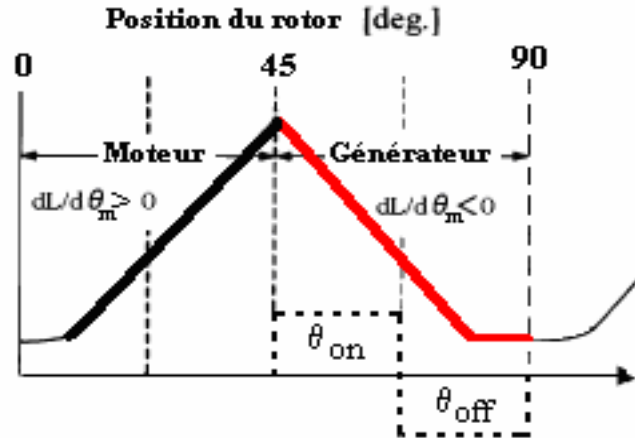


Figure. I.7: Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor [4].

Typiquement, il y a un nombre inégal de pôles saillants au stator et au rotor. Il existe pour cela des règles régissant le nombre de dents statoriques N_s et rotoriques N_r ainsi que le nombre de phases k pour assurer un bon fonctionnement de la MRV.

Dans notre application nous avons choisi une MRV triphasée à $N_s = 6$ dents stator et $N_r = 4$ rotor Figure (I.8).

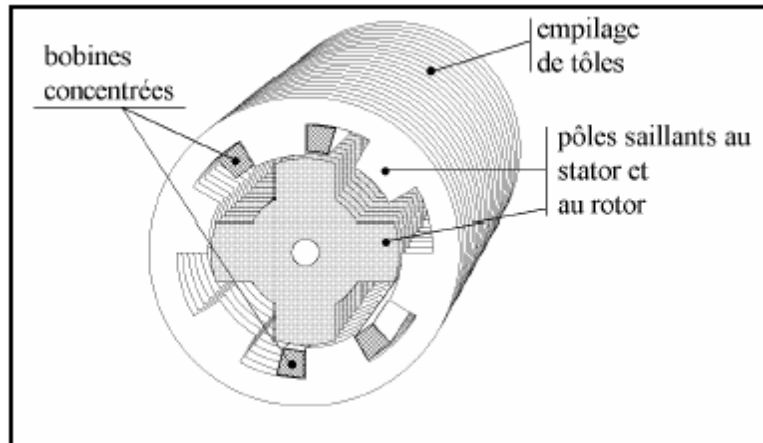


Figure. I.8 : Structure électromagnétique d'une MRVDS 6/4 triphasée[4].

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, l'injection d'un courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale (flux maximal) ; on observe ainsi une rotation du rotor vers la position de conjonction. Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à

l'opposition, alors on peut répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation Figure (I.9).

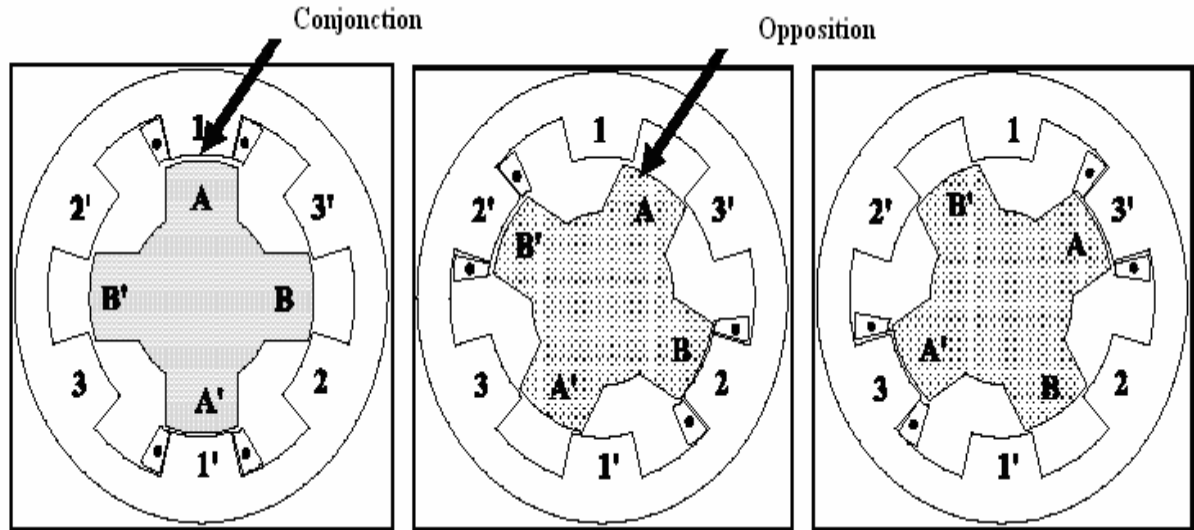


Figure. I.9 :Positions d'opposition et de conjonction d'une MRVDS 6/4[4].

La période de variation de la réluctance vue d'une phase correspond au passage de la conjonction d'une dent à la conjonction de la dent suivante.

La relation entre angles électrique θ_e et mécanique θ_m est donnée par :

$$\theta_e = N_r \cdot \theta_m \quad (I-2)$$

I.4 Conversion d'énergie

a- Notions d'énergie et de co-énergie

$$W_{em} = \int H \cdot dB = \int i \cdot d\psi \quad (I-3)$$

$$W'_{em} = \int B \cdot dH = \int \psi \cdot di \quad (I-4)$$

Dépend de la description initiale du système et du résultat désiré, souvent, le courant (i) étant plus accessible que le flux ψ , on choisit alors la co-énergie Figure (I.9).

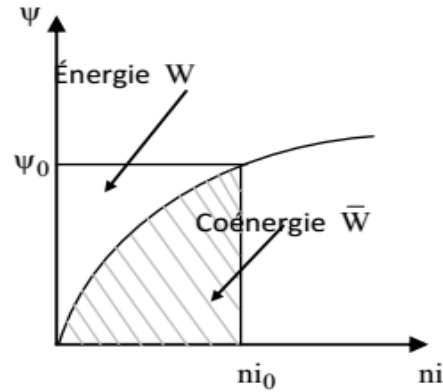


Figure. I.10 : l'énergie W_{em} et co-énergie W'_{em}

b- Notions l'énergie magnétique

$$W_{em} = \int i. d\Psi \quad (I-3)$$

$$T_e = - \left(\frac{\partial W_e}{\partial \theta} \right)_{\Psi=cst} \quad (I-5)$$

c- co-énergie :

$$W'_{em} = \int \Psi. di \quad (I-4)$$

$$T_e = \left(\frac{\partial W_c}{\partial \theta} \right)_{i=cst} \quad (I-6)$$

En régime linéaire, on montre que le couple s'exprime de la manière suivante :

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (I-7)$$

Qui indique que le couple ne dépend pas du sens du courant d'où possibilité d'une alimentation en courant unidirectionnel. Par contre, le couple dépend de la dérivée de l'inductance L par rapport à la position du rotor θ , d'où les deux types de fonctionnements déjà présentés dans la Figure(I.7)[9].

I.5 Domaines d'utilisation des MRV

En pratique, on distingue deux domaines d'application des moteurs à réluctance variable :

- Utilisation en moteur pas à pas : on envoie un certain nombre d'impulsions sur les bobines des phases successives, le rotor avance d'un nombre de pas égal au nombre d'impulsion. Cette utilisation, la plus classique, permet de réaliser des déplacements ou des positionnements précis avec une commande en boucle ouverte. Plus la précision demandée est grande, plus il faut de pas par tour. [3]

- Utilisation en moteur vitesse variable : en concurrence pour certaines applications avec le moteur asynchrone à cage ou le moteur synchrone à aimants permanents. Le moteur à réluctance variable est alors à commutation, c'est-à-dire que le courant dans chacune des phases est à chaque période établi puis coupé par un convertisseur [3].

I.6 Avantages et inconvénients des MRV

- Les avantages de la machine à réluctance variable sont les suivantes [11] :
 - ❖ Simplicité de la structure avec économie de matériaux : Les extrémités des bobinages (tête de bobine) sont plus courtes que dans le stator classique, donc l'enroulement axial et la masse de cuivre sont moindres, De ce fait, ce type de moteur est mieux adapté aux forts diamètres et faibles longueurs, ce qui est une contrainte souvent imposée par le dimensionnement aéraulique. Le rotor ne comporte pas d'aimant, et par conséquent pas de fret. Il est constitué de tôles empilées ou d'un bloc massif de matériau fritté.
 - ❖ Moindres coûts de fabrication : Le bobinage est rapporté après enroulement et non inséré à la main fil par fil. Simplicité de construction du rotor
 - ❖ Robustesse et sécurité de fonctionnement : Les phases sont découplées magnétiquement, ce qui permet au moteur de continuer à tourner en mode dégradé, en l'absence d'une phase, par exemple ; La sécurité de l'onduleur est augmentée, car les bobines sont en série avec les transistors, et donc limitent naturellement les variations brusques de courant : il ne peut pas y avoir de court –circuit de bras.

- Les inconvénients de la machine à réluctance variable sont les suivantes [11]:
 - ❖ Aspect vibratoire: Le moteur qui fonctionne sur la variation de saillance inhérente à l'anisotropie magnétique du rotor génère un couple dont les ondulations peuvent être très importantes en particulier si l'alimentation des plots statorique est séquentielle. Les vibrations qui en découlent sont né fastes pour les matériaux et source de naissance sonores non négligeables.
 - ❖ Aspect électrique: L'absence d'aimant est un avantage en coût et simplicité. Cependant, la magnétisation du rotor nécessite un courant important qui passe par le transit d'une puissance active, donc un facteur de puissance dégradé, et par conséquent, un surdimensionnement de l'onduleur.
 - ❖ Aspect rendement: Le courant nécessaire à la magnétisation du moteur est aussi une source de pertes.

I.8 Conclusion

Ce chapitre présent les notions générales de MRV et sa structure et ses différents types, ensuite le principe de son fonctionnement est expliqué ainsi que les équations qui gouvernent la production du couple à l'aide du circuit équivalent du moteur et du principe de la variation de la co-énergie dans un système électromagnétique.

Le Chapitre suivant sera consacré à l'établissement d'une modélisation de la machine MRV 12/8 par la méthode des éléments finis.

Chapitre II :
Analyse de la MRV
par la méthode des
éléments finis

II.1 Introduction

Le comportement de la MRV est fortement non-linéaire en raison de la variation de l'entrefer et la saturation du circuit magnétique. À cet effet, il est indispensable d'employer une méthode numérique, capable de fournir une précision élevée dans le calcul du champ avec le moins d'équations possibles, tel que la plus performante est la méthode des éléments finis MEF.

Plusieurs logiciels de modélisation sont basés sur le principe de la MEF tel que le "ANSYS". Ce logiciel nous permet d'évaluer des niveaux de saturation et d'analyser la répartition du flux dans les différentes parties du circuit magnétique. Pour la connaissance de champ électromagnétique dans la MRV il faut trouver la résolution des équations de Maxwell, peut être effectuée avec une méthode d'analyse numérique. La méthode la plus utilisée, et la mieux adaptée aux problèmes d'électromagnétisme rencontré en génie électrique, est la méthode des éléments finis.

Après avoir déterminé les caractéristiques statiques par MEF du prototype choisi MRV 12/8, nous allons finaliser ce chapitre par simulation sur Matlab de la MRV en mode génératrice pour bien comprendre le mécanisme de fonctionnement de la GRV.

II.2 Les équations électromagnétiques

II.2.1 Les Equations de Maxwell

Les équations de MAXWELL sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés [13] [14].

Ainsi qu'elles sont valables dans les différents milieux (air, milieu non homogènes, non linéaires et anisotropes...).

Ces équations sont :

- Equation de Maxwell-Faraday :

$$\overrightarrow{RotE} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II. 1)$$

- Equation de Maxwell-Ampère :

$$\overrightarrow{Rot}\vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (II. 2)$$

- Equation de conservation du flux magnétique :

$$Div\vec{B} = 0 \quad (II. 3)$$

- Equation de Maxwell-Gauss :

$$Div\vec{D} = \rho \quad (II. 4)$$

- Lois constitutives des milieux

$$B = \mu(H).H \text{ ou bien } B = v(B).B \text{ et } \vec{D} = \varepsilon\vec{E} \text{ où } \varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$$

Avec:

$\vec{E}$: Vecteur champ électrique [V/m].

$\vec{B}$: Vecteur induction magnétique [T].

$\vec{H}$: Vecteur Champ magnétique [A/m].

$\vec{D}$: Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m²].

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m³]

$\vec{J}_c$: Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m²]

ε : Permittivité électrique [F/m].

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

v : Réductivité magnétique [m/H].

En outre, la loi d'ohm généralisée doit être associée aux équations précédentes :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} + \sigma\vec{E} + \sigma(\vec{\mu} \wedge \vec{B}) \quad (II. 5)$$

Avec :

$\vec{\mu}$: Vecteur vitesse des pièces conductrices susceptible de se déplacer [m/s]

σ : Conductivité électrique [S/m]

$\vec{J}_{ex}$: Densité du courant d'excitation (les enroulements d'alimentation)[A/m²].

$\vec{E}$: Densité des courants induits du champ électrique E [A/m²].

$(\vec{\mu} \wedge \vec{B})$: Densité des courants induits par mouvement [A/m²].

L'équation (II.5) contient trois termes qui n'apparaissent pas en même temps pour un point donné du domaine étudié.

II.2.2 Modèle magnétostatique :

Le modèle magnétostatique permet l'accès aux caractéristiques de la MRV dans le mode statique, on va présenter les deux modèles scalaire et vectorielle.

II.2.2.1 Modèle magnétostatique scalaire :

Dans ce modèle, en admettant que les courants électriques soient nuls dans le dispositif à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps, on obtient alors les relations suivantes [23]:

$$\overrightarrow{Rot H} = 0 \quad (II. 6)$$

$$Div \vec{B} = 0 \quad (II. 7)$$

Cela implique qu'il existe une fonction Φ , potentiel scalaire magnétique telle que :

$$\vec{H} = \overrightarrow{Grad \phi} \quad (II. 8)$$

Dans un matériau ferromagnétique, Ainsi dans un milieu polarisable anisotrope considéré linéaire.

L'induction magnétique B est liée au champ magnétique H par l'équation:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (II. 9)$$

Avec :

$\vec{B}_r$: Vecteur induction magnétique rémanente.

La relation (II.6), signifie l'existence d'une fonction Φ , appelé potentiel scalaire magnétique tel que :

$$\vec{H} = \overrightarrow{Grad \phi} \quad (II. 10)$$

L'équation générale de ce modèle est la suivante :

$$Div(\mu \overrightarrow{Grad \phi}) = Div(\vec{B}_r) = 0 \quad (II. 11)$$

II.2.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique soit engendrer par des sources indépendantes du temps (donc le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$) et le champ électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$ sont découplés, cependant, cette fois-ci le dispositif électromagnétique est parcouru par des courants non nuls. Les équations de maxwell deviennent[23]:

$$\overrightarrow{Rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (II. 12)$$

$$Div \vec{B} = 0 \quad (II. 13)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (II. 14)$$

L'équation (II. 13) permet de définir un autre variable magnétique $\vec{A}$ appelé le potentiel vecteur nécessaire dans l'analyse des équations de Maxwell. Il peut être exprimé à l'aide de l'induction B comme suit :

$$\vec{B} = \overrightarrow{Rot} \vec{A} \quad (II. 15)$$

Afin que le vecteur potentiel magnétique soit totalement défini, sa divergence doit être fixée en utilisant la jauge de coulomb:

$$Div \vec{A} = 0 \quad (II. 16)$$

D'après les équations (II.12), (II.14), (II.15), on obtient :

$$\overrightarrow{Rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{Rot} \vec{A} \right) = \vec{J} + \overrightarrow{Rot} \quad (II. 17)$$

II.3 Les différentes méthodes de modélisation d'une MRV :

Plusieurs types de modèles ou méthodes existent aujourd'hui pour modéliser une machine à reluctance variable.

II.3.1 Les méthodes analytiques

Leurs principes sont basés sur les équations de fonctionnement de la machine électrique pour modéliser les effets électromagnétiques qui surviennent. Elles prennent la géométrie de la machine comme le point de départ pour arriver ensuite, à l'aide d'équations aux courbes de flux et de couple. Ces méthodes ont été les premières à être développées et elles s'appuient sur certaines hypothèses simplificatrices, elles sont très avantageuses en temps de calcul mais souvent au détriment de la précision[15][16][17][18][12].

II.3.2 Les méthodes d'interpolation

Ces méthodes font appel aux données collectées par des essais expérimentaux. L'intérêt de ces méthodes provient de la collection quasi instantanée des résultats pour une position, ceci est indispensable pour les applications avec un contrôle en ligne. Cependant, ces méthodes ne sont faciles à implémenter et en plus leurs coûts sont assez élevés. Récemment des méthodes dites méthodes intelligentes ont été appliquées avec succès dans des étapes très spécifiques de la modélisation de la MRV. Les méthodes les plus connues dans cette catégorie sont les méthodes par réseaux neuronaux artificiels ("Artificial Neural Network – ANN) et les méthodes par systèmes d'inférence adaptatives neurales Fuzzy ("Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems – ANFIS). Ces dernières méthodes évaluent le couple produit en fonction du flux mesuré en utilisant des méthodes Fuzzy neurales[12][17][18].

II.3.3 Les méthodes à base de circuit magnétique équivalent

Ces méthodes sont les plus répandues pour le calcul des caractéristiques du MRV. L'analyse par réseau de préséances est une de ces méthodes. Le circuit magnétique de la machine, obtenu à partir de la géométrie et des caractéristiques électriques et magnétiques est résolu par des méthodes de type circuits électriques. Les composantes passives du circuit sont les préséances d'entrefer et ferromagnétiques alors que les composantes actives sont les

sources magnétomotrices. La résolution du circuit magnétique peut être faite en linéaire ou en non-linéaire, avec les phases indépendantes ou couplées magnétiquement. La complexité de ces méthodes se situe à la fois dans le calcul précis des préséances d'entrefer pour les différentes positions du rotor et dans la résolution matricielle du système d'équations non linéaires. Les méthodes à base de circuit magnétique équivalent conjuguent la rapidité des méthodes analytique et la précision des méthodes des éléments finis par la prise en compte d'une bonne partie des phénomènes physiques locaux[12][13][18].

II.3.4 Les méthodes des éléments finis.

Le principe de la méthode est d'utiliser une formulation variationnelle des équations du champ électromagnétique et, quand cela n'est pas possible, de projeter, au sens vectoriel, sur les fonctions d'approximation la fonction d'erreur entre la formule approchée de la valeur du potentiel vecteur électromagnétique et la valeur exacte par définie les équations du potentiel vecteur. La valeur approchée du potentiel vecteur est définie comme une combinaison linéaire des valeurs aux nœuds d'un découpage défini et des fonctions de base associées aux éléments de dimension finie qui constituent ce découpage. La formulation adoptée, appliquée au découpage réalisé permet de transformer le système d'équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques linéaires si les équations de départ le sont et non linéaires dans le cas contraire.

La résolution par des méthodes itératives permet d'obtenir la valeur du potentiel vecteur A , en tous nœuds du domaine discrétisé et d'accéder par-là à toutes les grandeurs utiles pour la conception de la machine (induction, couple, F.E.M, courants, etc.)[19][20]

II.4. Résolution numérique par la méthode des éléments finis

II.4.1 Conditions aux limites

les conditions aux limites selon la nature du problème étudié, En électromagnétisme on a deux types de conditions [23]:

➤ Condition de Dirichlet

Elle impose une valeur constante du potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ sur la limite externe du domaine d'étude.

$$\vec{A} = Cte \quad (II. 18)$$

Ces valeurs sont prises nulles $A^{\rightarrow} = 0$ le long de la frontière du domaine par la considération de l'infini.

➤ Condition de Neumann

Dans le cas du système symétrique physiquement et géométriquement, les résultats de l'analyse seront symétriques. Donc, afin d'exploiter cette symétrie pour simplifier le problème avec un temps de traitement plus court en réduisant le domaine d'étude, la condition de Neumann nous renseigne sur la valeur du champ magnétique tangentiel égal à zéro aux bords du domaine étudié.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}} S = 0 \quad (II. 19)$$

avec

S : surface à laquelle la condition est définie.

$\vec{n}$: vecteur normal à S.

II.4.2 Méthode des éléments finis (MEF)

D'une manière générale, la Méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) et en particulier celles de Maxwell. Ce pendant, elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles, mais à une formulation intégrale équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes [14][12][18][17][15]:

- ✓ La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.
- ✓ La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié.

L'association d'un algorithme discret mathématique à la résolution par éléments finis permet d'obtenir une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles dans un domaine qui tient compte des conditions aux frontières et/ou à l'intérieur de ce domaine. On utilise les conditions de type Neumann (gradients aux bords), de Dirichlet (valeurs aux bords).

Pour la résolution d'un problème à l'aide des éléments finis, en premier on doit d'abord se poser les questions sur les conditions d'existence de la solution ; l'unicité de la solution si il y en a ; la stabilité ; les conditions et les contraintes ; la convergence ; la précision du maillage, le pourcentage d'erreur toléré.

Dans notre cas, le moteur électrique à RV est discrétisé. C'est-à-dire qu'il est décomposé en petits morceaux appelés éléments, on parle de maillage. Pendant la discrétisation ou le maillage, des points appelés aussi nœuds se montrent aux intersections de ces éléments. En outre l'utilisation des éléments finis est claire pour l'utilisateur et n'exige pas à priori la connaissance de la méthode de Galerkin ou encore la théorie mathématique des éléments finis [12][24].

Ainsi, les logiciels qui existent par exemple comme FEMM et Flux 2D et ANSYS, permettent de résoudre des problèmes de type électromagnétique sans avoir des acquis avancés en éléments finis. L'avantage principal de la méthode des éléments finis est sa précision, en plus cette méthode permet un calcul localisé des grandeurs électromagnétiques, cela se traduit par la possibilité de l'utiliser pour faire, soit une analyse complète du fonctionnement de la machine, soit plus souvent, pour obtenir des résultats intermédiaires utilisés par la suite à travers d'autres méthodes.

II.5 Modélisation électromagnétique de la MRV.

II.5 .1 Paramètres dimensionnels du prototype

La modélisation d'un prototype se fait en magnétostatique à l'aide du Logiciel ANSYS [Annexes A], ce dernier est basé sur la résolution des équations de Maxwell par la méthode des éléments finis. Le prototype est un moteur à réluctance variable à double saillance avec 12 pôles au stator, 8 pôles au rotor et 3 phases, chaque phase est constituée par deux pôles diamétralement opposés. Voir la figure ci-dessous (II.1).

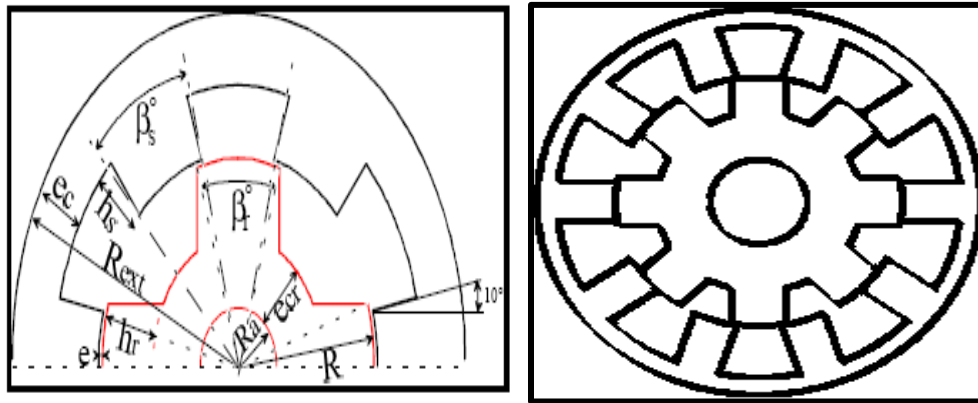


Figure. II.1: La géométrie et la définition des paramètres dimensionnels du prototype.

La modélisation en deux dimensions (2D) de la machine est suffisante et permet de prévoir les performances des machines, à travers le calcul des grandeurs globales. Les dimensions géométriques du prototype MRV qui sera étudié sont présentées par la figure (II.1)[21]. Et le tableau suivant :

Paramètres dimensionnels	Notation	Dimensions
Longueur active	L	151 mm
Rayon extérieur de stator	R_{so}	89.8 mm
Rayon intérieur de culasse stator	R_{sy}	78.4 mm
Rayon intérieur de stator	R_{si}	48.18 mm
Rayon extérieur de rotor	R_{ro}	47.82 mm
Rayon extérieur de culasse rotor	R_{ry}	30.3 mm
Rayon de l'arbre	R_{ri}	15 mm
Arc polaire du stator	β_s	15°
Arc polaire du rotor	β_r	15°
Epaisseur	E	0.36 mm
Nombre des spires /paire de pole	N_s	150

Tableau II.1: Principales dimensions du prototype

II.5 .2 Construction du circuit magnétique

Ce prototype contient trois types de matériaux :

- cuivre (bobinages statoriques) une perméabilité magnétique $\text{MUX}=1$, et d'une résistivité électrique $\text{RSVX}=1.724 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.
- l'air (entrefer et arbre mécanique) une perméabilité magnétique relative $\text{MUX}=1$.
- l'acier M19 (culasse statorique et rotorique) : une perméabilité relative $\text{MUX}=2000$ pour le modèle linéaire.

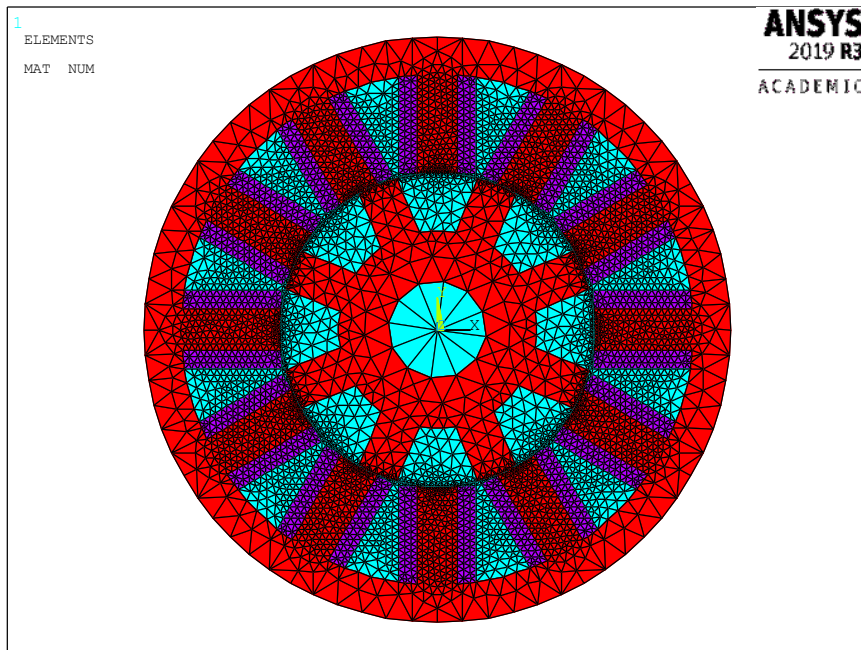


Figure. II.2: Répartition du maillage sur la machine complète.

II.5 .3 Résultats graphiques

Pour les résultats graphiques dans les deux positions extrêmes nous avons appliqué un courant continue est égale 8 A que est donnée une densité du courant électrique constante, ce qui signifie que cette valeur n'a pas excédée la valeur limité pour le matériau de cuivre ($5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$).

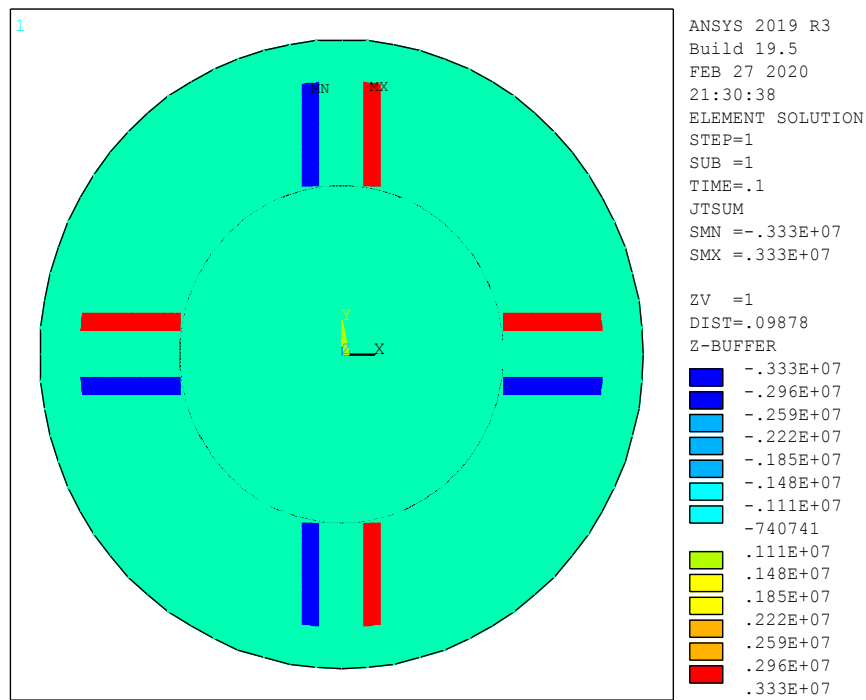


Figure. II.3:Densité du courant électrique

Dans la figure(II.3) présente la densité du courant électrique obtenu à l'aide logiciel ANSYS

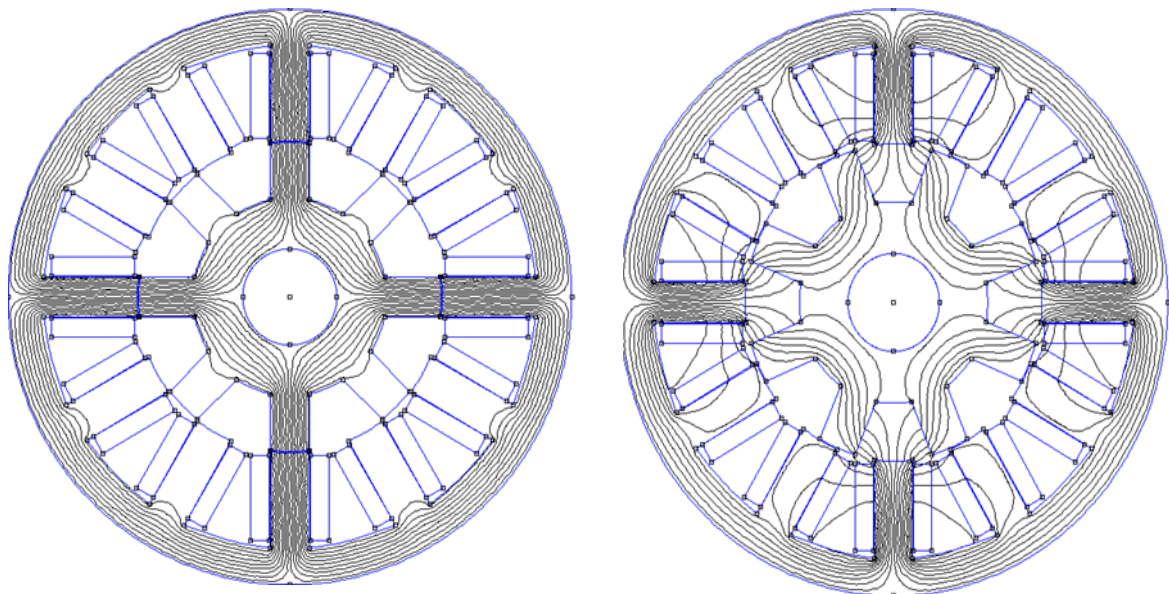


Figure. II.4: Distribution des lignes de flux dans les deux positions extrêmes

Dans la figure (II.4) présente la distribution des lignes de flux pour les deux cas extrême nous remarquons des lignes de fuite est grand dans la position conjonction.

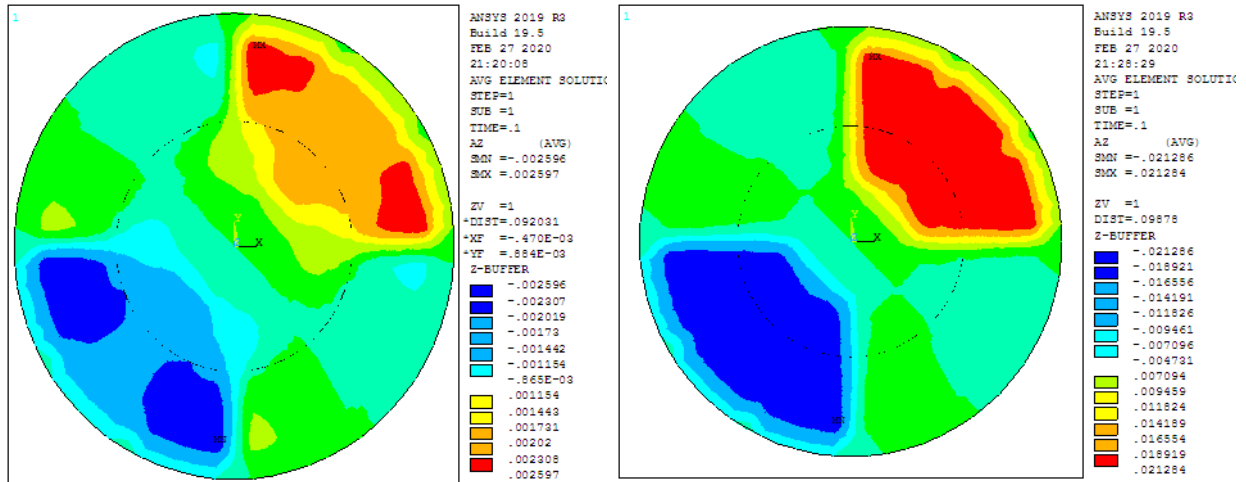


Figure.II.5 :Potentiel vecteur magnétique AZ dans les deux positions extrêmes

Dans la figure (II.5) présentent la distribution du potentiel vecteur AZ nous remarquons que la distribution est quasi-symétrique par rapport aux axes des pôles pour la position de conjonction et position d'opposition.

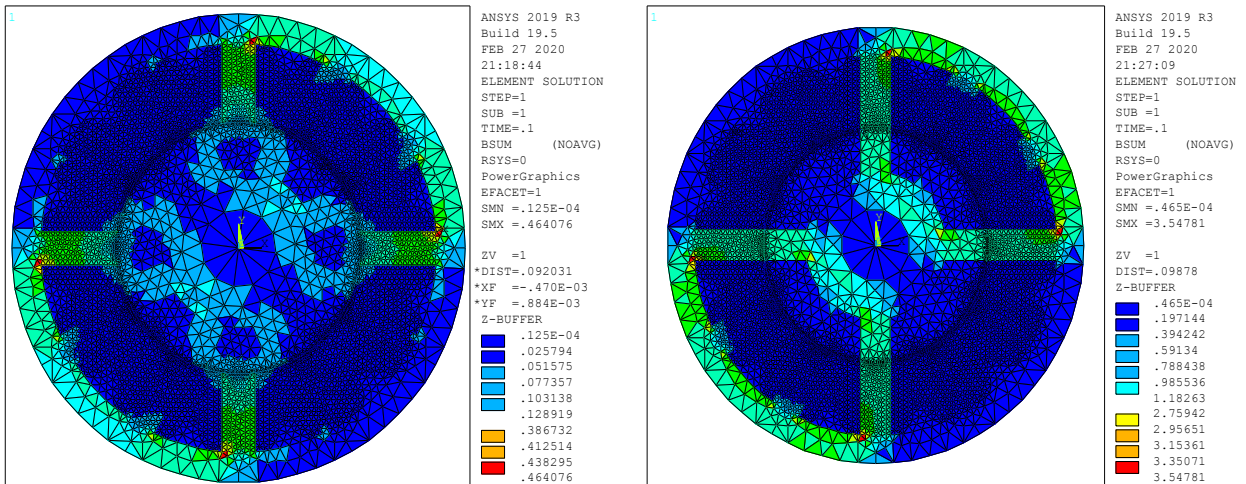


Figure. II.6: Répartition de la densité de flux magnétique pour les deux positions extrêmes

Dans la figure (II.6) présentent les directions des vecteurs d'induction magnétique pour les deux cas extrême nous remarquons que la valeur de l'induction est forte pour la position de conjonction et qu'elle est faible pour la position d'opposition

II.5 .4 Analyse de caractéristiques électromagnétiques

➤ Caractéristique du flux

La figure (II.7) représente le réseau de courbe du flux magnétique pour différentes positions du rotor et des niveaux du courant.

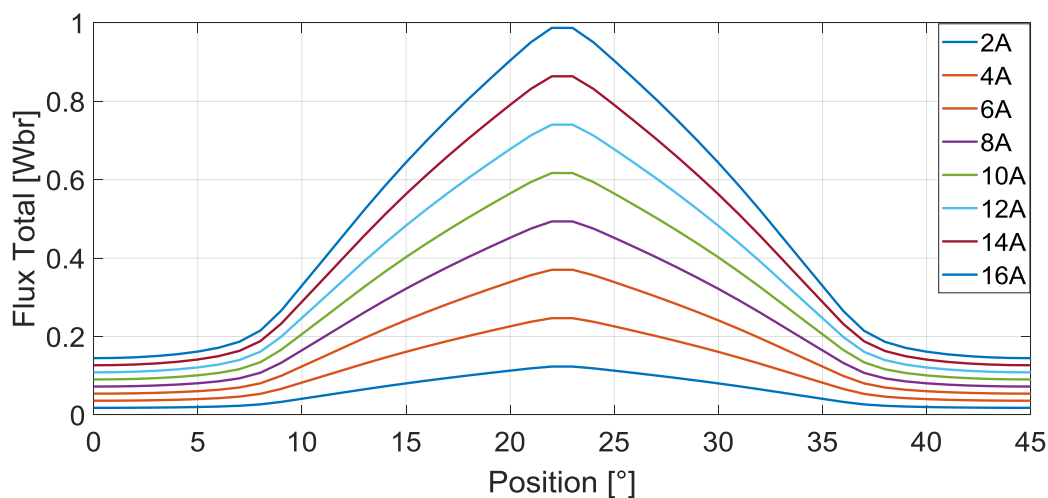


Figure. II.7 Caractéristique de flux pour différents niveaux du courant

Dans la figure (II.7) nous remarquons la proportionnalité de flux avec le courant, puisque au fur à mesure que le courant augmente, le flux suit cette augmentation

➤ Caractéristique magnétique de l'inductance

La figure (II.8) représente le réseau de courbes de l'inductance en fonction de θ pour différents niveaux du courant. Il est obtenu en se basant sur le flux total et le courant.

Dans ce paragraphe nous, en régime linéaire, nous nous intéressons qu'au réseau de courbes de l'inductance qui devient une seule quel que soit le niveau du courant. En effet comme le montre bien la figure (II.8), pour le modèle linéaire c'est à dire dans le cas où la caractéristique magnétique $B(H)$ est linéaire. Qu'elle existe une seule courbe de l'inductance et que celle-ci varie uniquement avec la position du rotor.

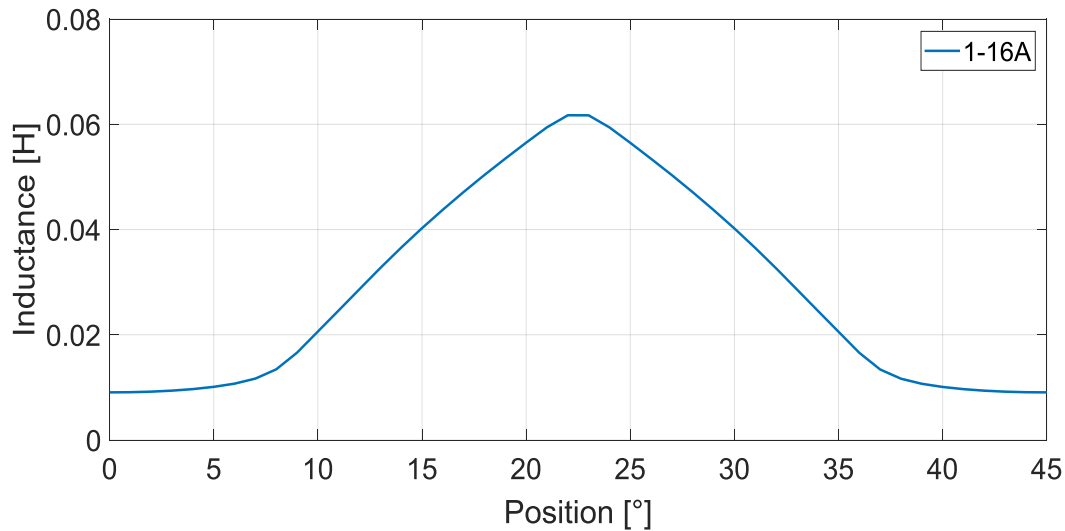


Figure. II.8 Courbes de l'inductance en fonction de θ pour différents niveaux du courant

Dans La figure (II.8) nous remarquons la variation de l'inductance est varié seulement avec la variation de l'angle de position du rotor.

➤ Caractéristique du couple

La figure (II.9) montre leréseau de courbes de couple électromagnétique en fonction de la position du rotor et les niveaux du courant. Rappelant que pour aboutir à ces courbes, une interpolation a été utilisée. Cette dernière était suffisante car un ensemble considérable de points intermédiaires ont été obtenus de l'analyse par MEF.

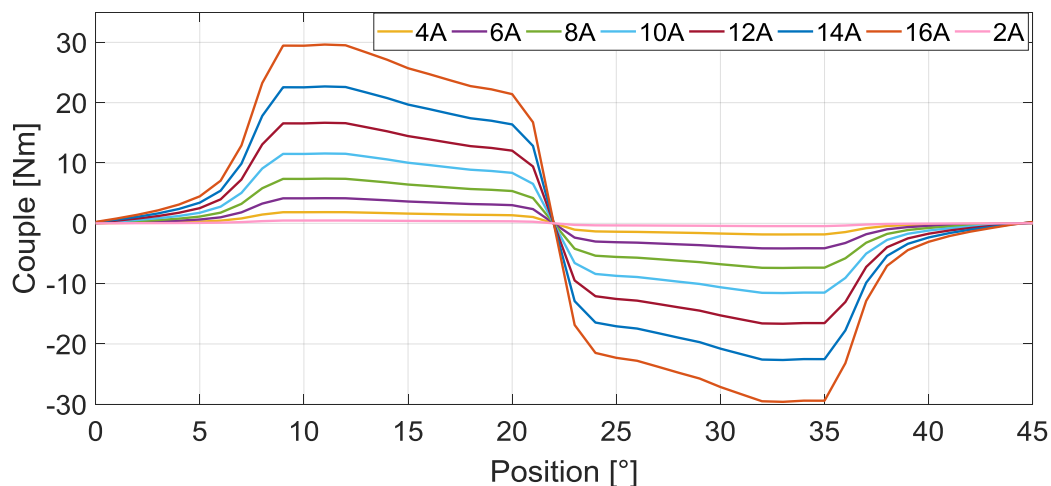


Figure II.9 Réseau de courbes de couple statique en fonction de la position du rotor pour différents niveaux du courant

Dans la figure (II.9) nous remarquons que le couple maximal est proportionnel au courant, Ainsi, l'effet de la position sur le couple. Aussi dans la figure (II.9) montre pour différents niveaux de courant que le couple statique est :

- Positif quand la variation de l'inductance est croissante
- Négatif quand la variation l'inductance est décroissante.
- Nul quand il n y a pas de variation.

II.6 Simulation de la MRV en mode génératrice (GRV)

Avant de commencer la simulation de la GRV en utilisant son modèle non linéaire, il est nécessaire de bien choisir la position initiale du rotor qui ne doit pas être dans la zone où l'inductance L a une valeur constante car le couple serait nul. Quand le couple résistant de la charge est nul, la variable θ , correspondant à la position du rotor, n'évolue pas et la machine serait arrêtée tout le temps. Pour notre machine particulière, un angle initial θ été choisi, pour éviter ce cas de couple de charge nul.

Dans cette application, nous utilisons la modélisation en éléments finis par la méthode des circuits couplés, cette fois la bobine est alimentée à partir d'une source de courant continue pour savoir le comportement de la MRV dans différent valeur de courant

Parameter	Valeur
Tension/phase	300 V
Vitesse	1000 Tr/min
θ_{ON}	22.5°
θ_{OFF}	33°

Tableau II.2: Les paramètres de la première application

➤ l'équation de puissance de GRV [25].

$$P_S = \frac{N_s \cdot N_r \cdot V_{DC}^2}{w} \left(\int_{\theta_{on}}^{\theta} \frac{(\theta - \theta_{on})}{L(\theta)} d\theta + \int_{\theta_{on}}^{\theta} \frac{(\theta_{off} - \theta - \theta_{on})}{L(\theta)} d\theta \right) \quad (II.20)$$

Avec

N_s : sont le nombre de pôles du stator

N_r : sont le nombre de pôles du rotor,

Θ : est la position angulaire du rotor,

w : est la vitesse mécanique

Par Equation (II.12), il est vérifié que la puissance de sortie GRV est directement influencée par les angles de tir, la tension du circuit intermédiaire et vitesse de fonctionnement.

La même puissance de sortie peut être générée avec différentes combinaisons de ces variables de pilote. Ce pendant, ces variables affectent directement les pertes électriques et magnétiques, et les ondulations de couple [25].

Cette partie présente les résultats de la variation des angles θ_{on} et θ_{off} avec une vitesse de 1000 tr/min et puis compare les résultats de couple électromagnétique



{ 30 }

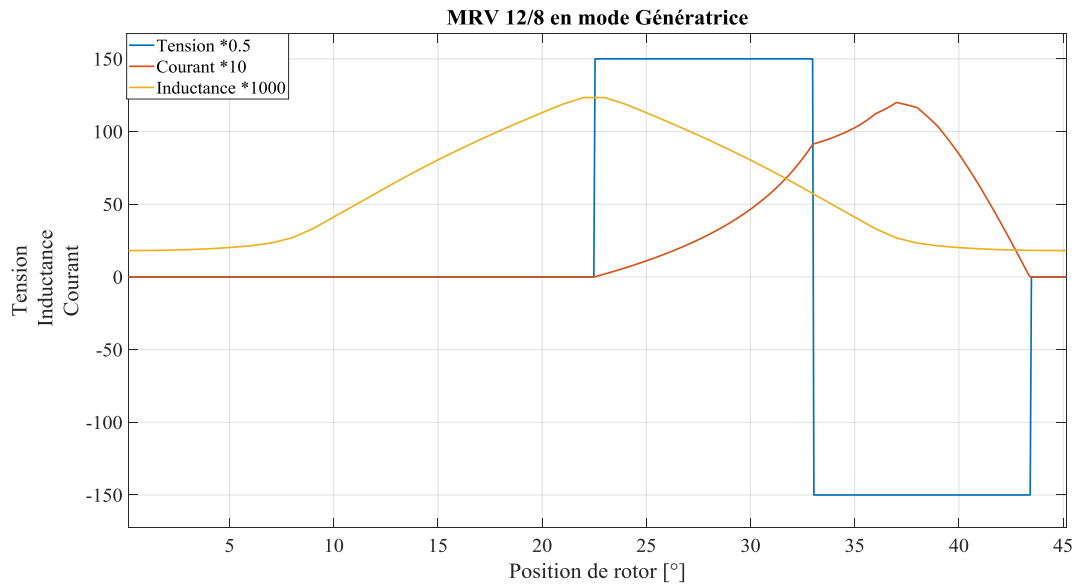


Figure. II.11 L'influence des impulsions sur la tension et l'inductance de la machine

Dans la Figure (II.11) représente les courbes de l'inductance et de la courant de la phase A, la courant est amorcée lors de la décroissance de l'inductance. Conformément aux tracés théoriques de la Figure (II.11) on obtient les mêmes tracés.

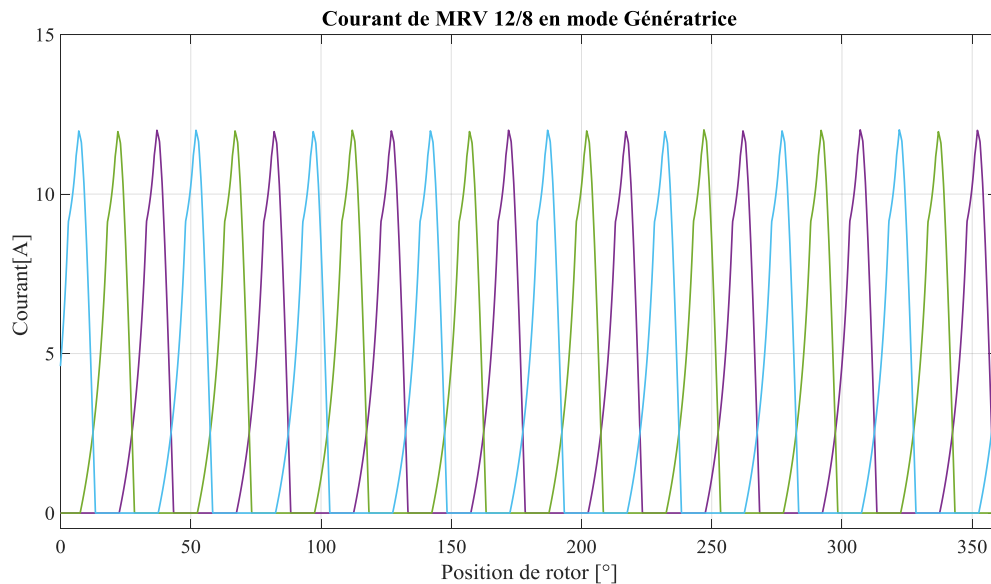


Figure. II.12: Courant électrique des trois phases

Dans la figure (II.12) présentent respectivement, le courant électrique pour les trois phases, sachant que tous les résultats en fonction de la position de rotor.

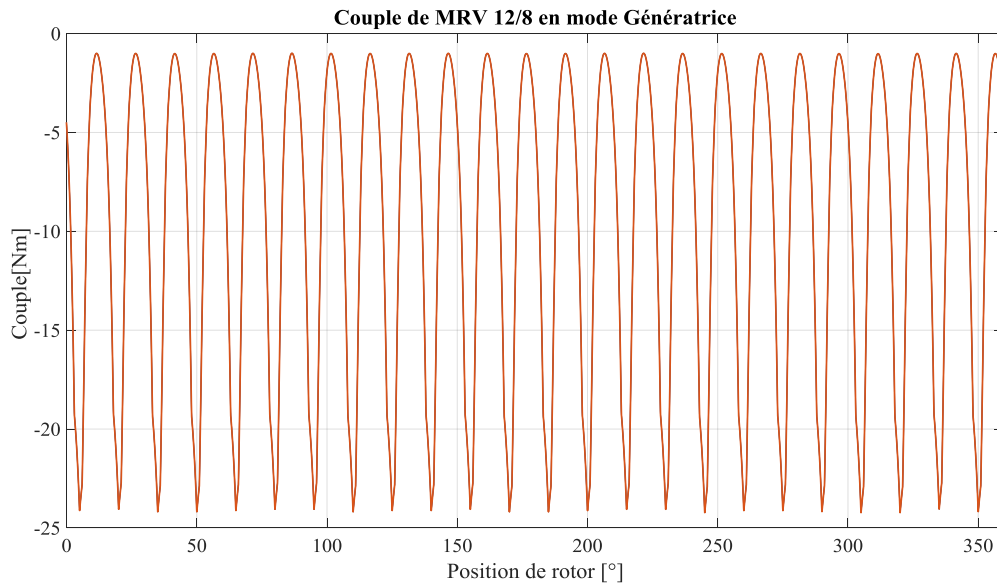


Figure. II.13: Couple électromagnétique généré par chaque phase pour $\theta_{ON} = 22.5^\circ$
et $\theta_{OFF} = 33^\circ$

La figure (II.13) présente le couple électromagnétique total où l'on remarque que la valeur du couple est négative c'est-à-dire que la machine fonctionnant en mode générateur ainsi que les ondulations sont très importantes ce dernier est un gros inconvénient dans le MRV en général

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit et discuté en détail sur la modélisation par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS APDL de MRV 12/8. Grâce à cette modélisation, les caractéristiques statiques du flux, de l'inductance et du couple ont été déterminées pour être utilisées comme données de paramètres dans la simulation en mode moteur ou génératrice.

Ensuite, la simulation et les résultats de la génératrice à réluctance variable de type MRV 12/8 ont été présentés.

Dans le chapitre suivant la modélisation et la simulation de la turbine éolienne et la commande de la GRV seront présents et se combinent pour avoir la performance de l'objet de ce travail.

***Chapitre III :
Commande HCC de
la GRV associé à la
technique MPPT de
la turbine éolienne***

III.1 Introduction

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années. L'énergie cinétique du vent transformée en énergie électrique, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable .

Dans ce chapitre, on va présenter la modélisation et la simulation de la turbine éolienne avec une génératrice à réluctance variable. Ensuite, nous allons développer et associer la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) de la turbine avec la commande HCC de la GRV . HCC en présence de la boucle de contrôle du couple. Enfin, nous allons présenter les résultats de la simulation pour valider l'efficacité des performances de la MPPT de GRV et l'effet de faire varier les angles de la mise sous tension θ_{on} et la mise hors tension θ_{off} .

III.2 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien, entre elles s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien et des vitesses des vents plus élevées que le nord [26].

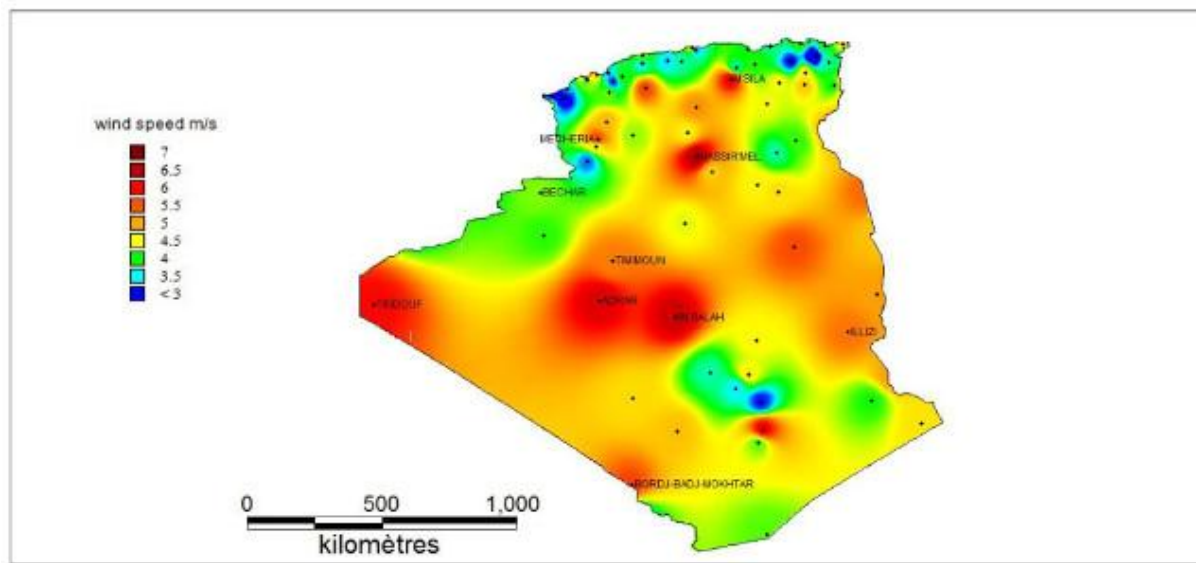


Figure.III.1 : Carte annuelle des vitesses du vent à 10m du sol en (m/s) en 2014 [27]

III.3 Généralités sur les éoliennes

III.3.1 Définition d'énergie éolienne

L'énergie éolienne, c'est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent, c'est aussi une énergie cinétique produite par l'air en mouvement [28] .C'est l'une des formes d'énergies renouvelables.

III.3.2 Définition d'un système éolienne

Le système de conversion éolien est principalement constitué par : [29]

- Une turbine éolienne avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique
- Un générateur électrique qui convertit une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique.
- Une charge électrique qui peut être statique ou dynamique, ou un réseau de distribution d'énergie électrique.

- Une interface d'électronique de puissance, qui est en général placée entre le générateur et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et, éventuellement, en régime dynamique.

III.3.3 Types des éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. [30]

III.3.3.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical généralement un rendement plus faible. Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical au sol qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220km/h et quel que soit leur direction.

III.3.3.2 Eoliennes à Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, Le principe est celui d'un rotor est parallèle au sol.



vertical



horizontal.

Figure.III.2 :Eoliennes à axe vertical et axe horizontal

III.3.4 Constitution de la Turbine Eolienne

Nous présentons les éléments principaux constituant une telle éolienne [31][32][33]

- Rotor : Le rotor est composé, généralement, de 3 pâles à inclinaison variable. L'autre partie est le collecteur/moyeu qui supporte les pâles sur l'arbre, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.
- Nacelle : La nacelle regroupe tout le système divers actionneurs de commande, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique. de la nacelle qui nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent.
- Tour : La tour est l'un des principaux composants d'une éolienne car elle supporte le poids de l'ensemble. Le tour Généralement un tube d'acier, doit être le plus haut possible. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

Dans la figure III.3 est présent Tous ces éléments de la Turbine Eolienne

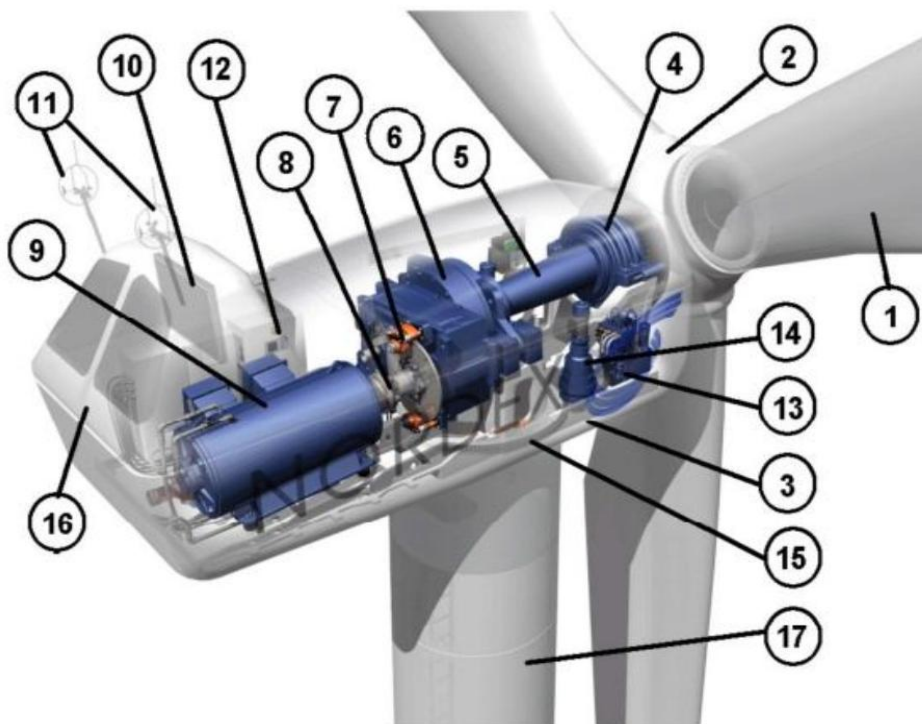


Figure.III.3 : Différences parties d'une éolienne

1	Les pales	10	Radiateur de refroidissement
2	Moyeurotor	11	Central de mesures
3	Nacelle	12	Équipementdecontrôle
4	Cardan	13	Central hydraulique
5	L'arbre	14	Mecanismed'orientation
6	Multiplicateur de vitesse	15	Paliers du systemed'orientation
7	Freinàdisque	16	Un capot en acier
8	Accouplement flexible	17	Tour
9	Génératrice		

III.3.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable

III.3.5.1 Eolienne à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable. Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice[34]. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité dusystème dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

III.3.5.2 Eolienne à vitesse variable

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. Comme le

montre le tableau ci-dessous, les principales avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevé, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leur principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance [34]. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique.

III.4 Modélisation de la Turbine Eolienne

III.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Afin de modéliser la turbine, nous appuierons sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées. Ainsi nous supposons que [36] :

- ✓ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques
- ✓ Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- ✓ Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement

III.4.2 Modélisation de la turbine

Considérons le système de la figure (III.4) qui représente un tube de courant d'air autour d'une éolienne à axe horizontal, S1 représente la surface balayée en amont de l'aérogénérateur et la surface balayée S2 en aval.

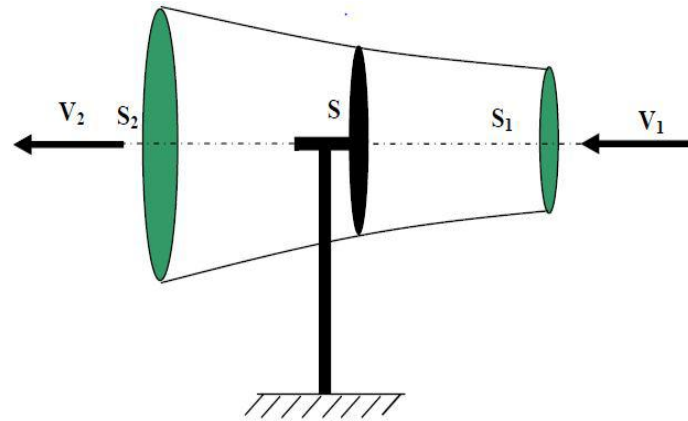


Figure.III.4 :Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Dans la figure (III.4) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{III.1})$$

➤ **La puissance aérodynamique**

$$P_{areo} = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V^3 (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.2})$$

Avec

S : Surface balayée par l'éolienne $S = \pi \cdot R^2 (m^2)$

ρ : Masse volumique de l'air (1.225 kg/m^3)

V_1 : Vitesse du vent (m/s).

V_2 : Vitesse d'aérodynamique (m/s).

V : Vitesse moyenne du vent (m/s).

➤ **la puissance du vent :**

$$P_v = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (\text{III.3})$$

Le rapport de vitesse λ :

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine sur la vitesse instantanée de vent V [37]:

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{V} \quad (\text{III. 4})$$

Avec

R_t : Le rayon des pales de l'éolienne

Ω_t : La vitesse de rotation de l'éolienne

➤ Le couple aérodynamique

Le couple aérodynamique est défini comme suite :

$$C_t = C_{aere} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} = P_t / \Omega_t \quad (\text{III.5})$$

➤ Le coefficient de puissance C_p

On définit le coefficient de puissance comme étant le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [37].

$$C_p = P_{aero} / P_V \quad (\text{III.6})$$

La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de **Betz**, est de 16/27 soit 0.593 [37].

L'étude d'une l'éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = A_1 \left[\left(\left(\frac{A_2}{\lambda_i} \right) - A_3 \beta - A_4 \right) e^{\frac{A_5}{\lambda_i}} + A_6 \lambda \right] \quad (\text{III. 7})$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 - 1} \quad (\text{III. 8})$$

Avec

β : L'angle de l'orientation de la pale.

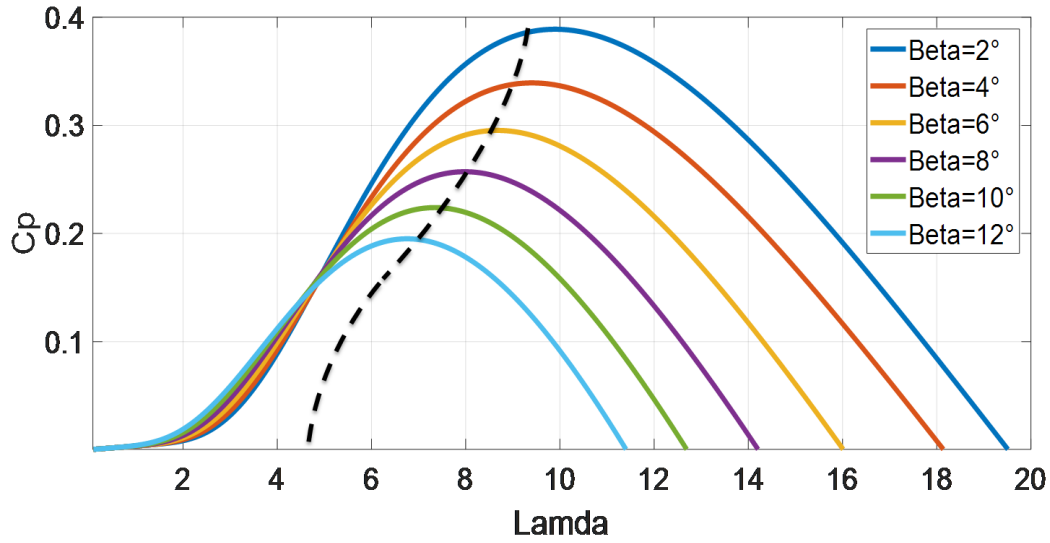


Figure. III.5 Coefficient de puissance en fonction de λ et β

III.4.3 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par un gain de vitesse G tel que:

$$G = \Omega_{mec} / \Omega_t \quad (III.9)$$

$$C_g = C_t / G \quad (III.10)$$

III.4.4 Modélisation de l'Arbre Mécanique

$$\Omega_{mec} = (C_g - C_{em}) \frac{1}{J_{total} \cdot S + f} \quad (III.11)$$

Avec

C_g : Le couple multiplicateur

C_{em} : Le couple électromagnétique

J_{total} : L'inertie totale

f : est le Coefficient de frottement visqueux.

III.4.5 Schéma bloc du modèle de turbine

Le schéma bloc de la figure III.6 correspond à la modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être recalculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine. Prendre en considération le rendement de la turbine C_p . Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur. La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique C_{em} du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation [35].

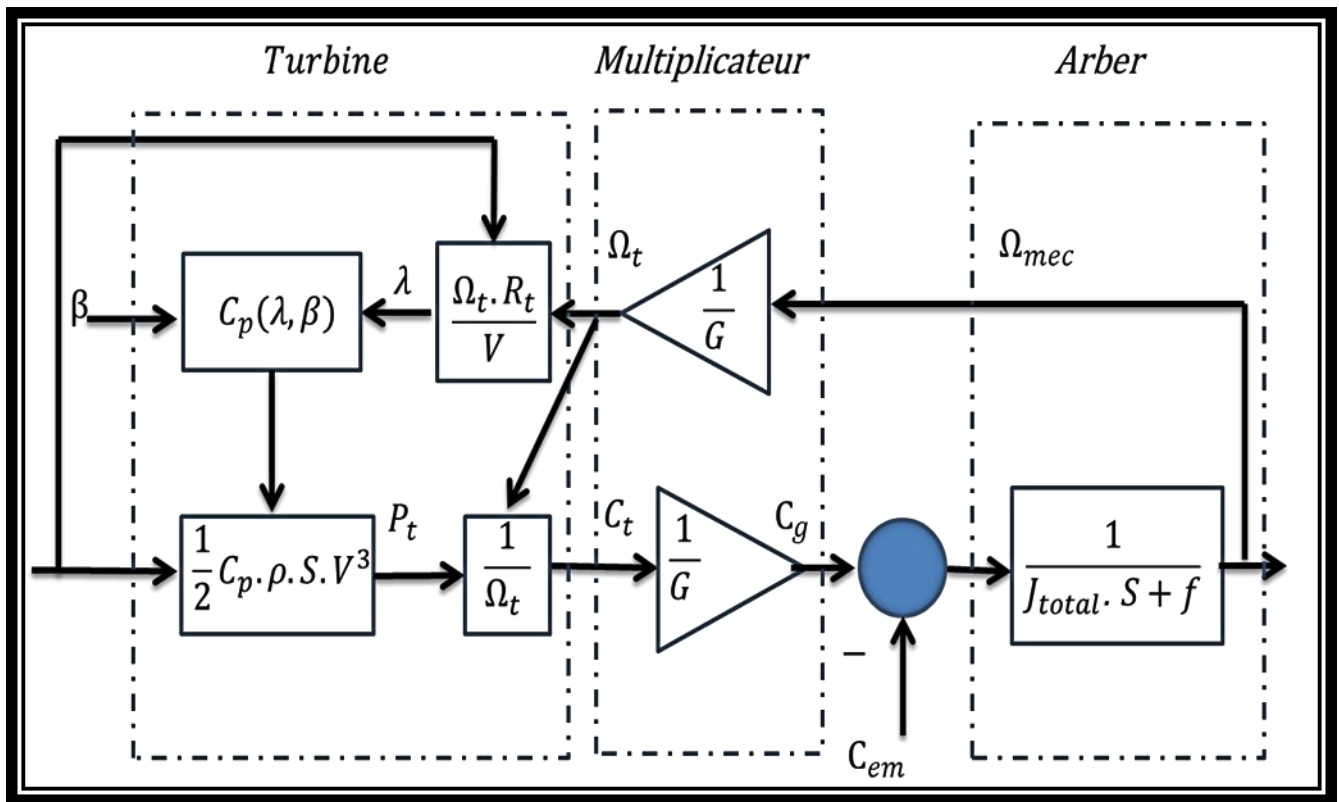


Figure. III.6 Schéma bloc du modèle de turbine.

III.5 Fonctionnement de la Turbine Eolienne

III.5.1 Zones de fonction d'une turbine éolienne

Les vitesses V_D , V_n et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [39]:

- **Zone I** : la turbine est en cours de démarrage
- **Zone II** : dans laquelle on cherche à extraire la puissance maximale du vent, par le technique MPPT (Max Power Point Tracking, où suivie du point de puissance maximale).
- **Zone III** : où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n (Puissance nominal),
- **Zone IV** : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

Nous proposons ce pendant dans ce mémoire de nous focaliser sur l'efficacité énergétique des systèmes éoliens de petite puissance avec dispositif MPPT.

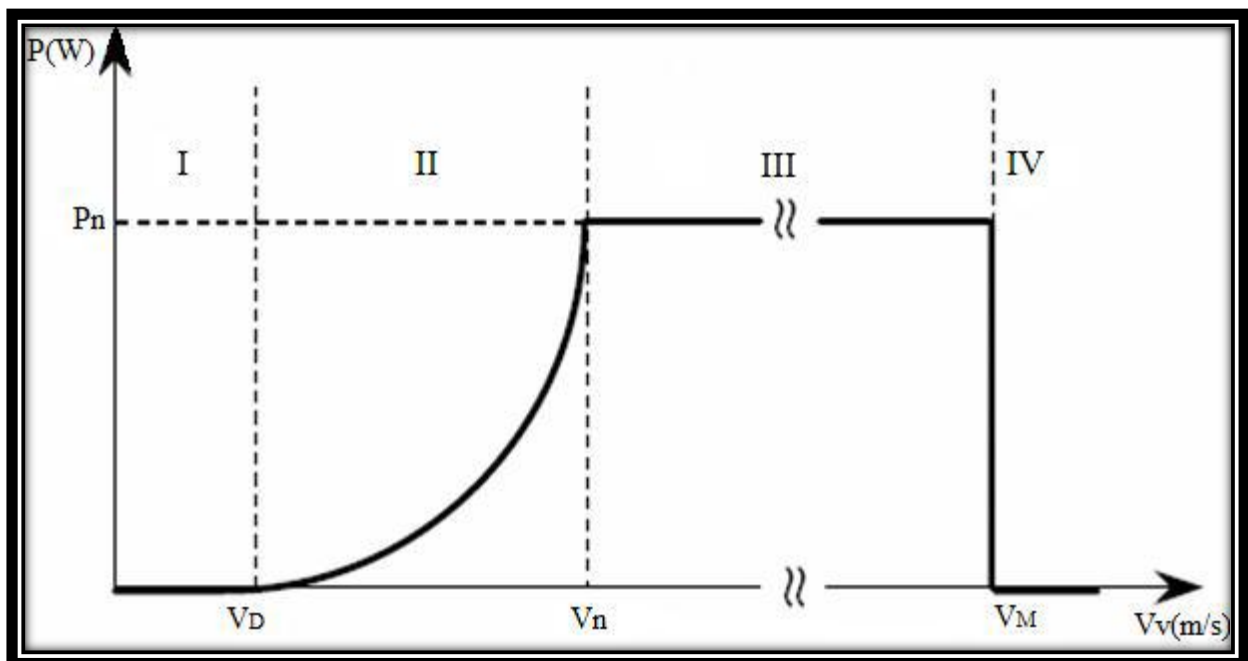


Figure III.7: Caractéristique puissance d'une éolienne

III.5.2 Points de MPPT d'une éolienne

Dans ce mémoire on s'intéresse au fonctionnement de la phase MPPT. Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT (MPPT : Maximum Power Point Tracking). Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. Pour une vitesse de vent donnée, la puissance mécanique extraite d'une turbine éolienne est une résultante qui dépend de la vitesse de rotation des pales du rotor. De par la nature fluctuante de la source éolienne qu'est le vent, il est préférable de disposer d'une méthode de détermination de la vitesse rotation optimale de la génératrice à aimant permanent permettant d'extraire du vent une puissance mécanique maximale. [38]

Le concept de la recherche du point d'extraction du maximum de puissance désigne le fait d'optimiser la vitesse de rotation de la génératrice relativement à la vitesse du vent, d'où une puissance mécanique maximale est obtenue. Nombreux sont les chercheurs qui ont écrit des textes sur le sujet et présenté des algorithmes sur c'est la stratégie. On distingue deux Méthode possibles [36]:

- La première Méthode, plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance C_{pmax} pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales (λ optimal et C_{em} optimal) Comme le montre de la figure (III.8).
- La deuxième Méthode, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue et contrôler avec asservissement de la vitesse mécanique.

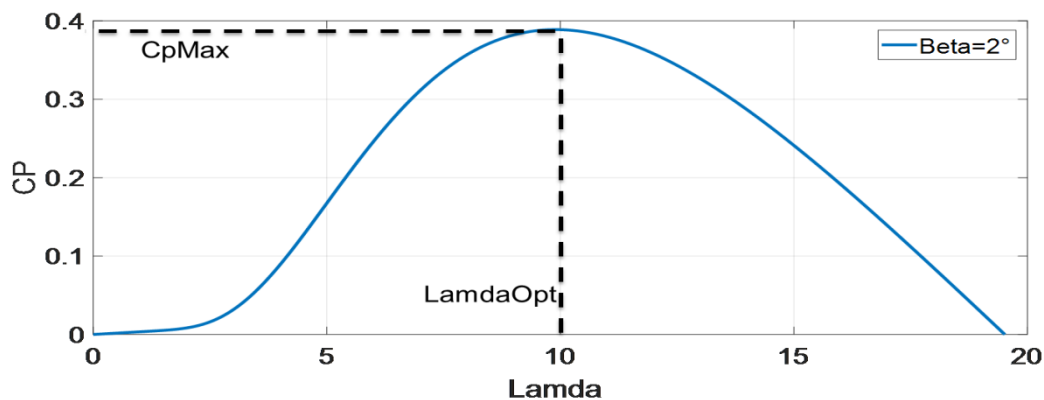


Figure.III.8 : Caractéristiques de C_p pour $\beta=2^\circ$

La valeur optimale du coefficient de puissance est obtenue pour $\lambda_{opt}=10$ et $Cp = 0.39$

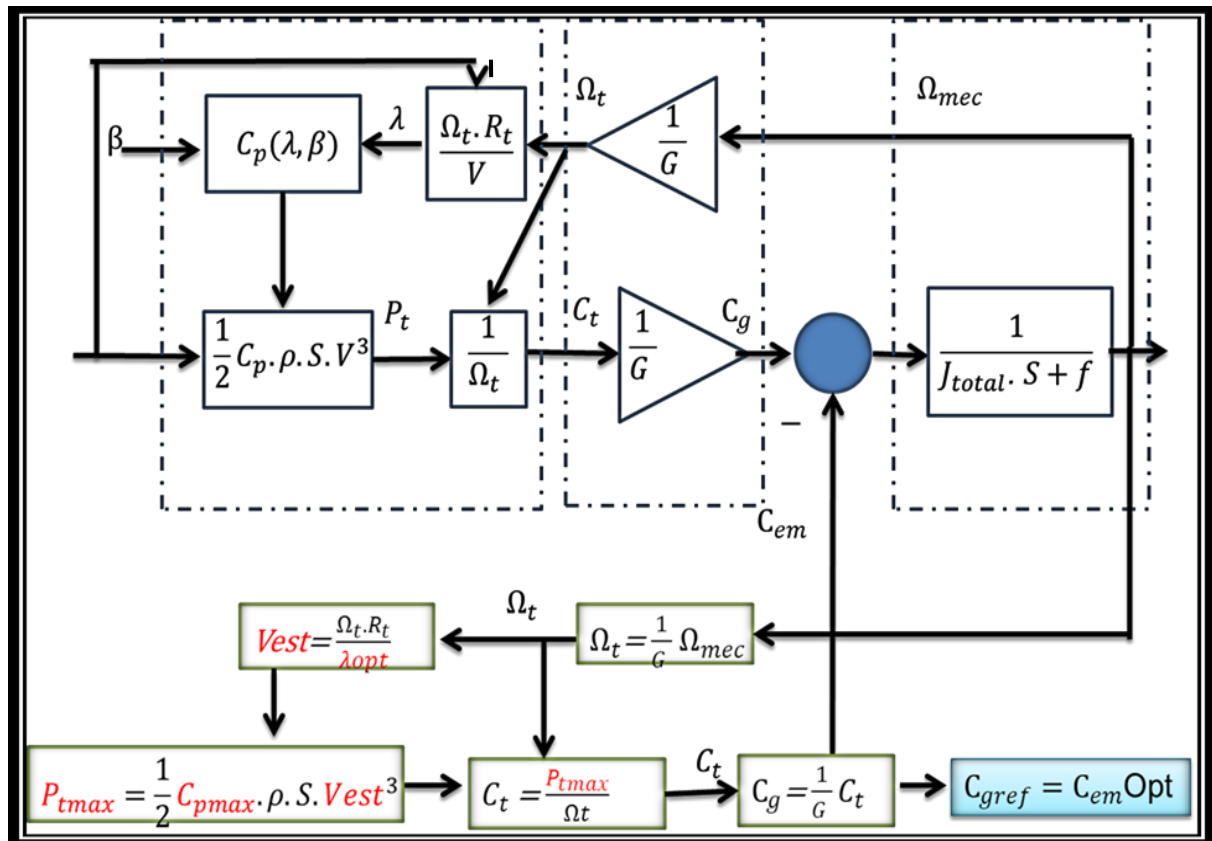


Figure. III.9 : Schéma bloc de maximisation de la puissance MPPT de la turbine éolienne

Le système de contrôle MPPT tel qu'illustré à la Figure(III.9) doit trouver la puissance maximale P_{tmax} ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale V_{est} pour vitesse du vent basée de λ_{opt} et P_{max} basée sur $C_{p_{\text{max}}}$, et suivant la puissance maximale calculée on a trouvé le couple optimale qui doit être appliqué à la turbine pour avoir le MPPT

III.5.3 Résultats de Simulation de la turbine éolienne avec MPPT

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Cette vitesse sera modélisée, dans cette étude.

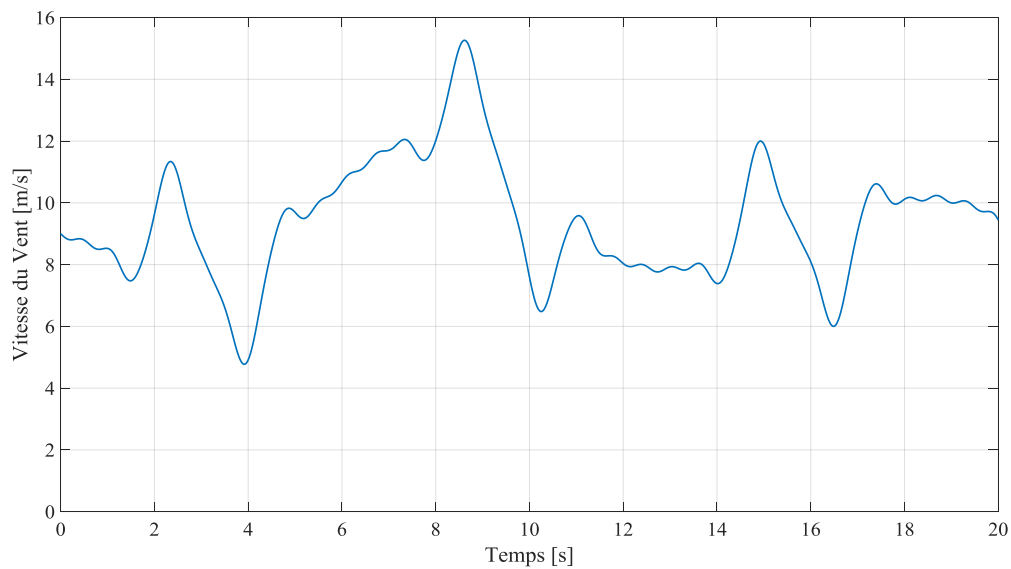


Figure.III.10 : Simulation du profil de la vitesse du vent.

Dans la figure (III.10) représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 8.8 m/s.

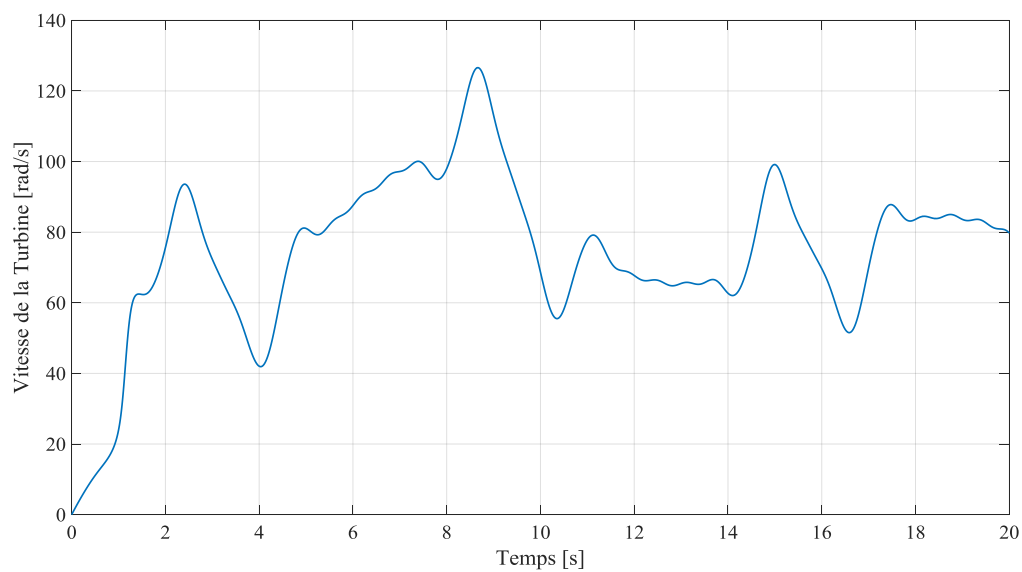


Figure.III.11 : Simulation du profil de la vitesse de la turbine

Dans la figure(III.11)nous observons que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence, qui est variable selon le profil du vent imposé.

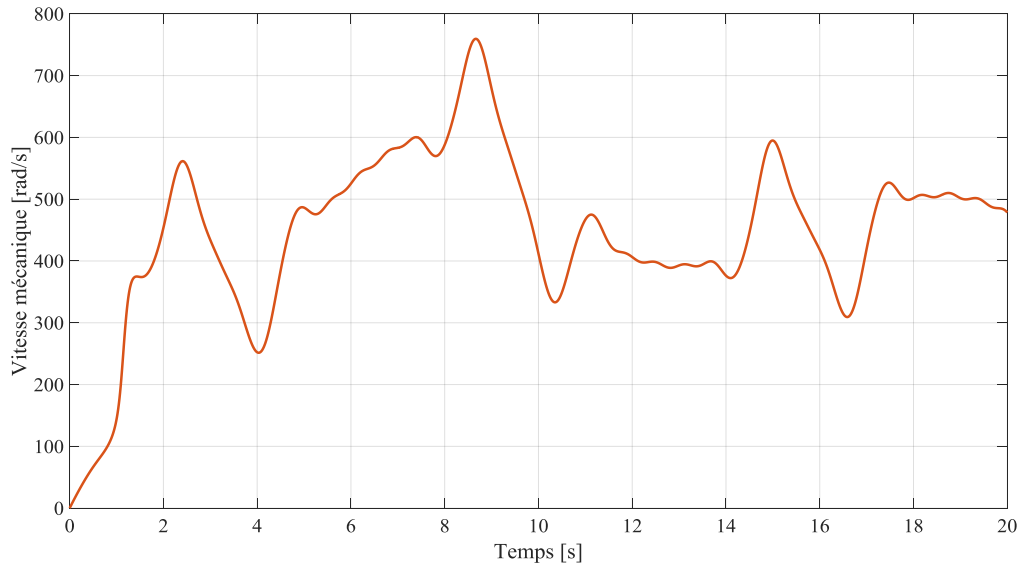


Figure.III.12 : Simulation du profil de la vitesse mécanique

Dans la figure (III.12) nous observons une convergence de profile de la courbe de vitesse entre la vitesse mécanique et la vitesse de la turbine (Voir Figure III. 11) avec multiplication G en utilisant le multiplicateur.

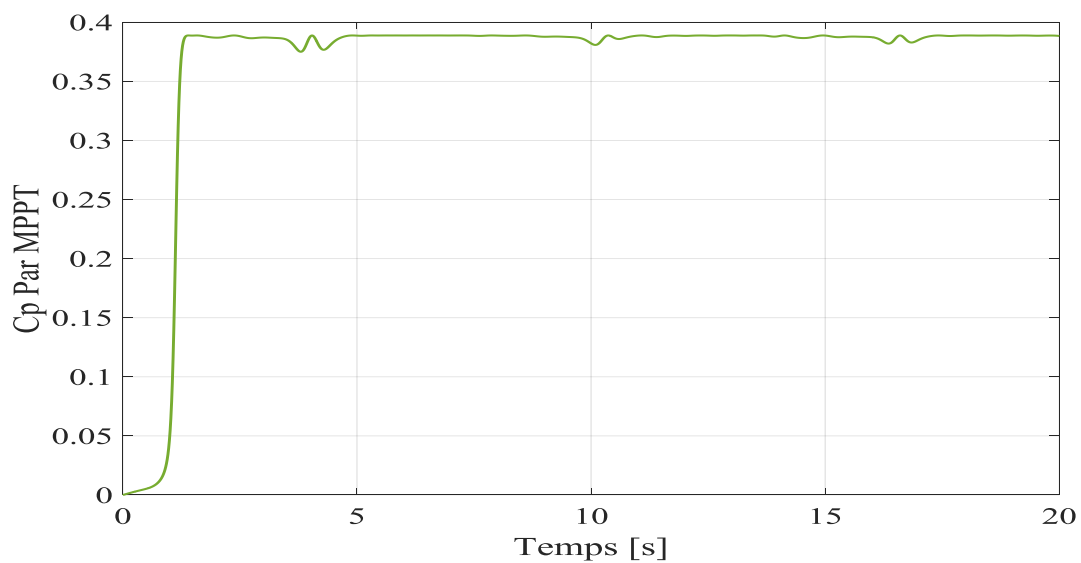


Figure III.13: Simulation du profil de le coefficient de puissance

Dans la figure (III.13) nous observons le coefficient de puissance C_p est presque maintenu à leur valeur Maximale (La valeur Maximale est 0.39 voir Figure III.8). Cela permet d'avoir la puissance maximale extractible.

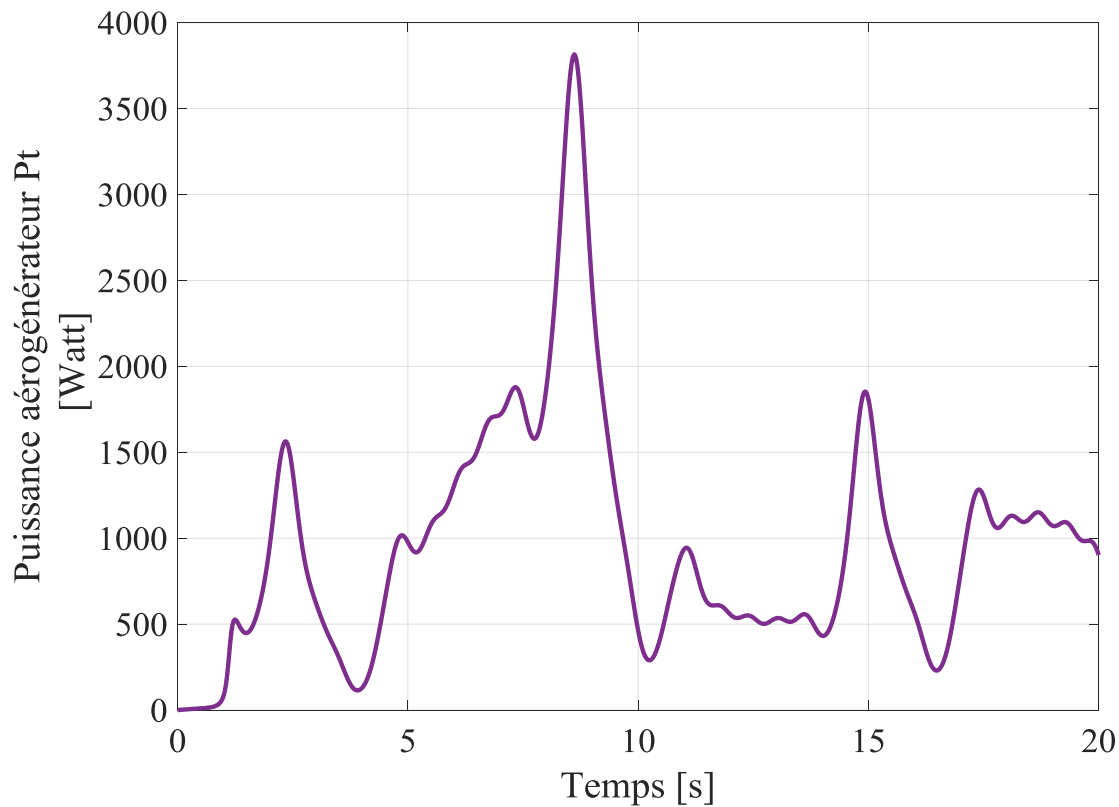


Figure. III.14 : Simulation du profil de la puissance de l'aérogénérateur.

Suite à la valeur C_p dans la figure précédente, nous concluons que la figure (III.14) présente la puissance maximale grâce à la méthode MPPT .

III.6 Stratégie de commande HCC de la GRV

III.6.1 Convertisseur électronique de puissance

Le contrôle du moteur à RV est une tâche difficile exigeant des spécialistes hautement qualifiés. Chaque phase est contrôlée indépendamment en utilisant le contrôleur d'hystérésis ou la commande MLI. La plupart des applications utilisent un pont asymétrique pour contrôler le courant dans une bande d'hystérésis. Le pont asymétrique permet de trois états de tension, $+V_{cc}$, 0 et $-V_{cc}$, donc, selon la méthode de contrôle, soit les deux ou les trois états sont utilisés pour commander une machine à réluctance variable [23] [18].

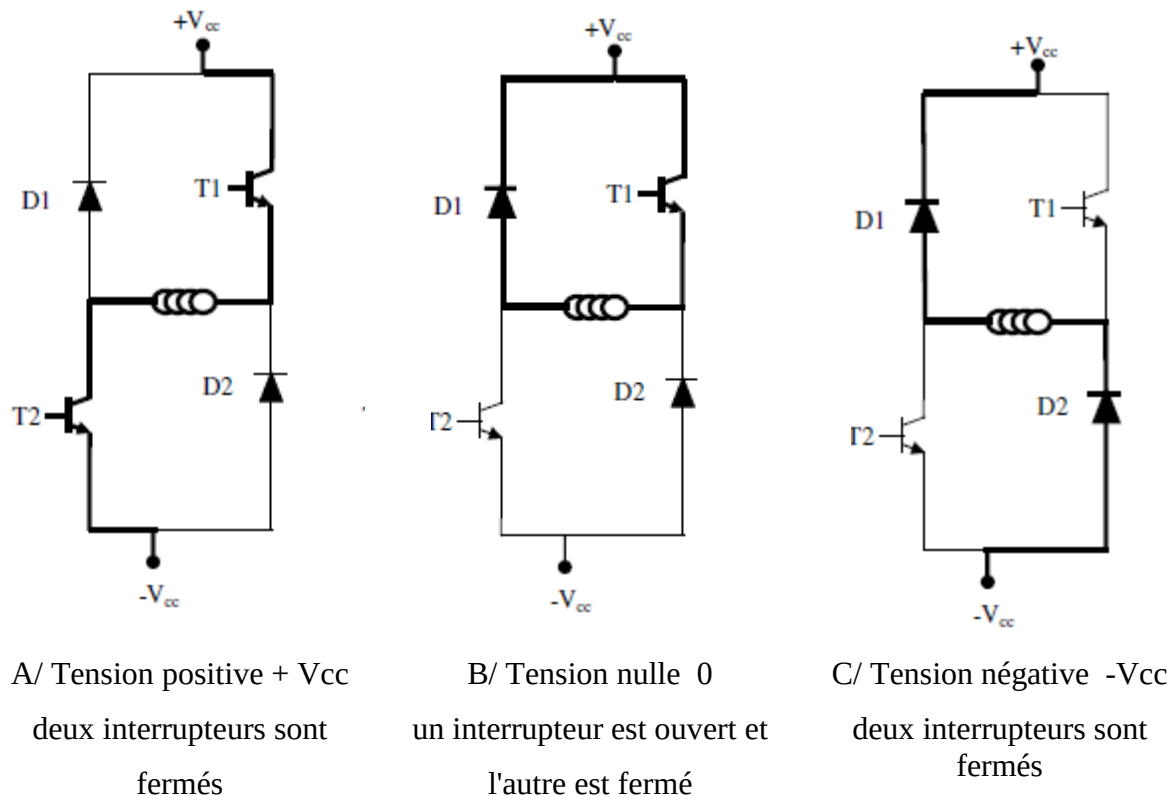


Figure III.15 Les états possibles de la tension d'alimentation pour une phase de la MRV

Les différentes techniques de commande des machines à reluctance variable a doublé saillance qui agissent surtout sur l'alimentation du moteur sont :

- La commande en pleine tension (Haute vitesses).

- La modulation de largeur d'impulsion de la tension d'alimentation MLI.
- Réglage des courants par hystérésis.

Dans le paragraphe suivant seul la stratégie de commande en courant par hystérésis sera présenter car elle la plus utilisées [23]

III.6.2 Stratégies de commutation

Chaque phase est contrôlée indépendamment en utilisant le contrôleur d'hystérésis, La plupart des applications utilisent un pont asymétrique pour contrôler le courant dans une bande d'hystérésis. Le pont asymétrique permet de trois états de tension, + V_{cc} , 0 et - V_{cc} , donc, selon la méthode de contrôle, soit les deux ou les trois états sont utilisés.

Lorsqu'une commande simple d'hystérésis ou une commande de couple moyenne est effectuée, une certaine valeur du courant est imposée entre les angles de commutation ($\theta_{on}, \theta_{off}$). Le courant doit être contrôlé entre les limites de la bande d'hystérésis en utilisant une stratégie de commutation dure, souple ou hybride[23] [18] [40] [41] [42] comme le montre la figure (III.16).

- **la commutation dure** : la valeur du courant augmente lorsque les deux transistors sont allumés et une tension positive égale à la tension du bus continu V_{cc} est appliquée à la phase. Lorsque la limite supérieure de la bande d'hystérésis est atteinte et que le courant doit diminuer, les deux transistors sont éteints, le courant passe à travers les diodes et une tension négative - V_{cc} est appliquée à la phase.
- **la commutation souple** : Si une pente négative du courant est imposée comme référence, l'application d'une tension nulle à la phase n'est pas toujours suffisante pour que le courant de phase soit respecté.
- **un commutation hybride** : permet d'utiliser tous les trois états de tension autorisés par le pont asymétrique. Dans cette stratégie, la bande d'hystérésis a une autre valeur de seuil supérieure à la valeur supérieure de la bande définie. Lorsque le courant atteint la limite supérieure de la bande, un transistor est désactivé et une tension nulle est appliquée à la phase. Si le courant continu est augmenté, le deuxième transistor est fermé et une tension négative - V_{cc} est appliqué à la phase.

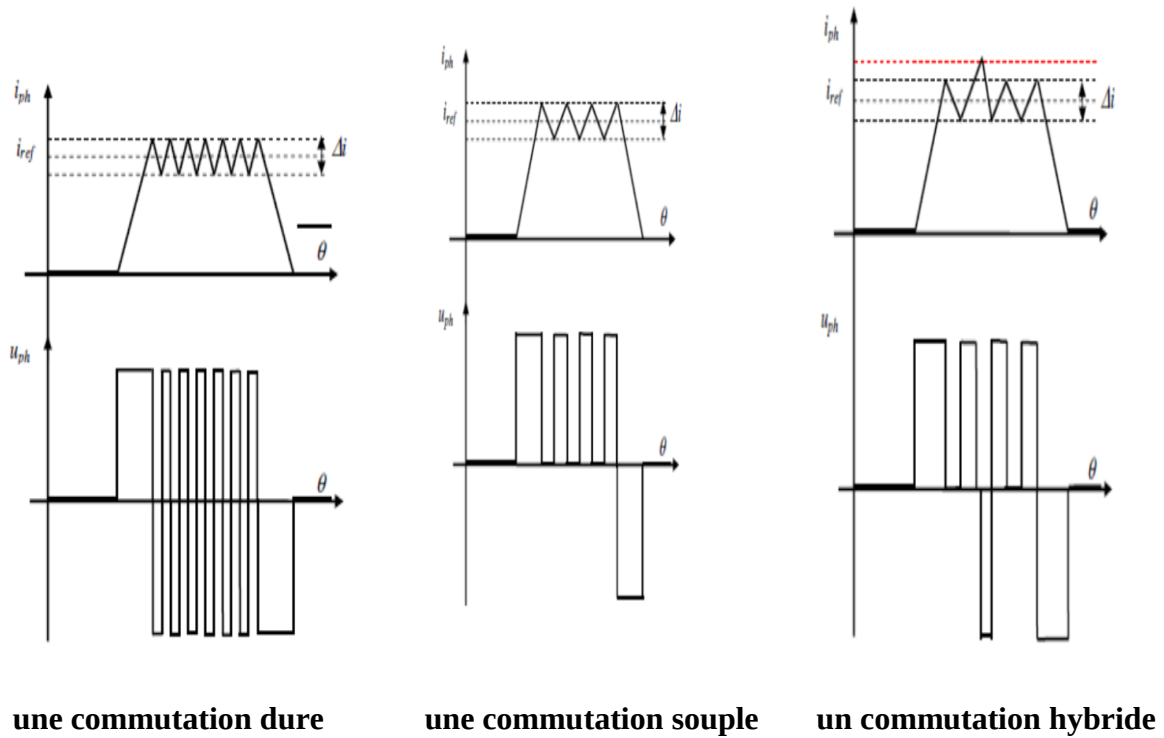


Figure.III.16 : Contrôle de courant par hystérésis en utilisant une commutation dure et souple et hybride

La stratégie adoptée dans la suite est la commutation dure en utilisant le comparateur d'hystérésis simple. Son but est de maintenir le courant électrique de chaque phase dans unecouronne circulaire comme la montre la figure (III.16).

III.6.3 Control du couple par la commande HCC

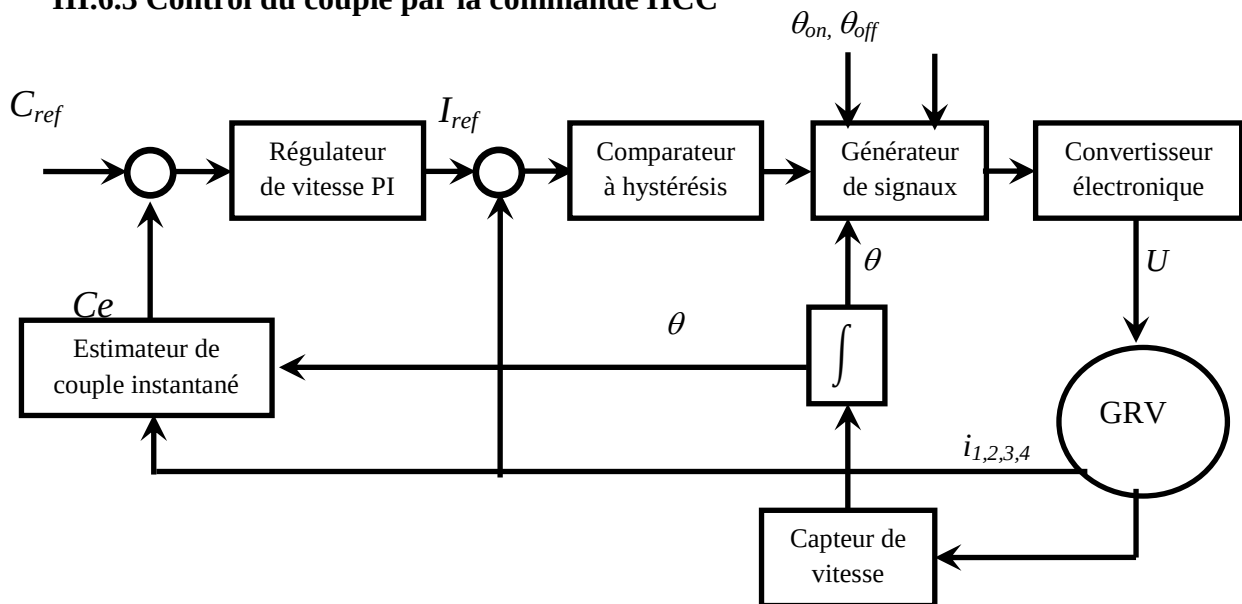


Figure. III.17 Commande HCC en présence de la boucle de contrôle du couple

Chaque phase est contrôlée indépendamment en utilisant le contrôleur d'hystérésis, La comparaison entre le couple désiré et le couple mesure nous donne la valeur du courant référence grâce à un régulateur classique PI, ensuite la commande HCC fait le nécessaire pour générer les signaux par la comparateur d'hystérésis pour avoir le courant mesuré comme la référence. Le courant doit être contrôlé entre les limites de la bande d'hystérésis en utilisant une stratégie de commutation dure, souple ou hybride aussi entre les limites des angles de commutation ($\theta_{on}, \theta_{off}$). Dans notre commande, nous allons utiliser le cas de la commutation dure, comme le montre dans la figure III.17.

III.7 Association et simulation de HCC avec MPPT de la turbine éolienne

Dans ce chapitre, nous avons présentons le modèle de la turbine. Puis, nous allons développer les associations de la MPPT de turbine avec la GRV (étudié dans la chapitre précédent), ce dernier ne nécessite pas des vitesses élevées du vent contrairement à d'autres systèmes qui exigent une vitesse élevée.

La régulation de couple en boucle fermée pour la commande HCC associé à la technique MPPT de la turbine éolienne est représentée dans la figure (III.18). Dans cette méthode de contrôle, la technique MPPT génère le signal du couple de référence qui représente le couple optimal pour avoir la puissance maximale. Le signal du couple estimé se compare avec la couple référence pour le traitement à l'aide d'un régulateur proportionnel intégrale (PI). Le régulateur de vitesse génère la valeur de courant désirée pour assurer l'égalité entre la couple mesurée et la couple de référence, donc la vitesse ne sera pas contrôlée. Le courant désiré est considéré comme une référence pour la boucle de commande HCC. Dans cette boucle, la grandeur du courant dans un enroulement de phase du moteur est mesurée directement et comparée avec le courant référence afin de déterminer l'erreur. L'erreur de courant est compensée par la stratégie de commutation utilisée par le comparateur d'hystérésis. En conséquence, le comparateur d'hystérésis de courant génère les signaux d'état pour toutes les phases activées en fonction de l'erreur de courant. Le générateur de signaux est combiné les états des interrupteurs de phases dépend des angles de commutation de la mise sous tension, hors tension d'une phase et de la démagnétisation ($\theta_{on}, \theta_{off}$) afin de contrôler les signaux de commutation qui sont dirigés vers le convertisseur électronique.

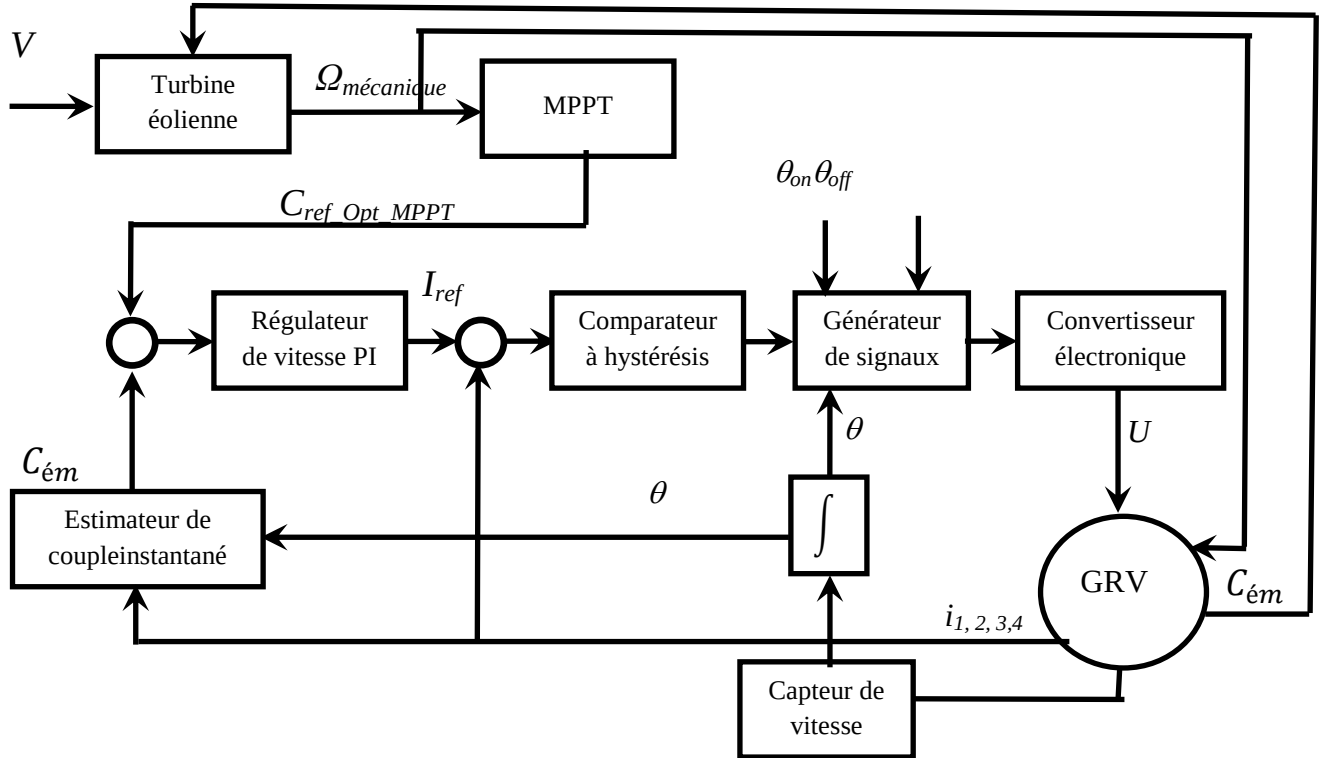


Figure. III.18 Commande HCC de la GRV associé à la technique MPPT de la turbine éolienne

Le mécanisme du système de commande HCC donne des étapes logiques ou un algorithme de contrôle pour avoir une couple de référence en contrôlant le courant électrique sans contrôle de vitesse car l'importance est le couple électromagnétique pour avoir MPPT et la vitesse sera générée automatiquement selon l'équation mécanique

III.8 Résultats de simulation de la GRV associé à la technique MPPT

Le contrôle le HCC sont l'une des techniques efficaces pour réduire le couple désiré dans la GRV, les techniques de contrôle HCC sont mis en oeuvre pour GRV 12/8 dans différentes conditions de fonctionnement, en tenant compte l'importance des paramètres de contrôle qui sont les angles de commutation ($\theta_{on}, \theta_{off}$) et ce pour une vitesse 1000 tr / min.

Pour la simulation de l'association GRV-turbine éolienne, on a considéré la vitesse de la turbine est varié selon trois niveaux. Dans ce cas, on a proposé la vitesse du vent en fonction du temps comme la figure(III.19).

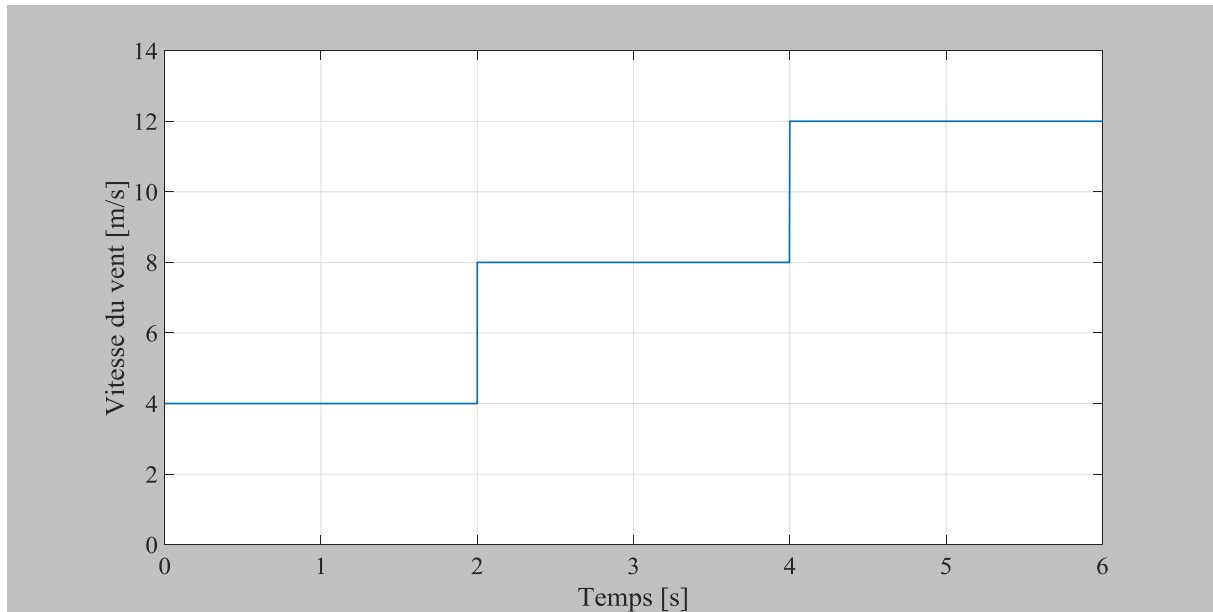


Figure. III.19 La vitesse du vent

Simulation du système éolien sans contrôle est effectuée pour étudier la réponse du système en régime dynamique en utilisant une vitesse du vent variable. Dans cet essai, le générateur de vitesse du vent fournit une vitesse de 4 m/s pour 0 à 2 seconde et 8 m/s pour la période de 2 à 4 seconde et 12 m/s pour la période de 4 à 6 seconde comme on peut le constater dans la figure (III.19).

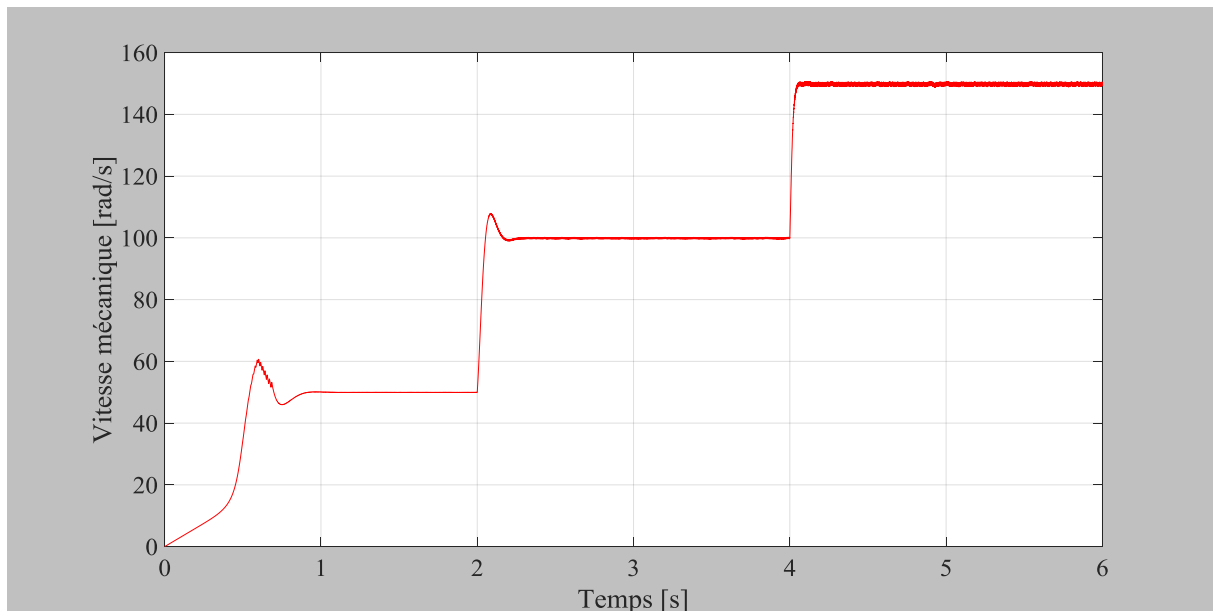
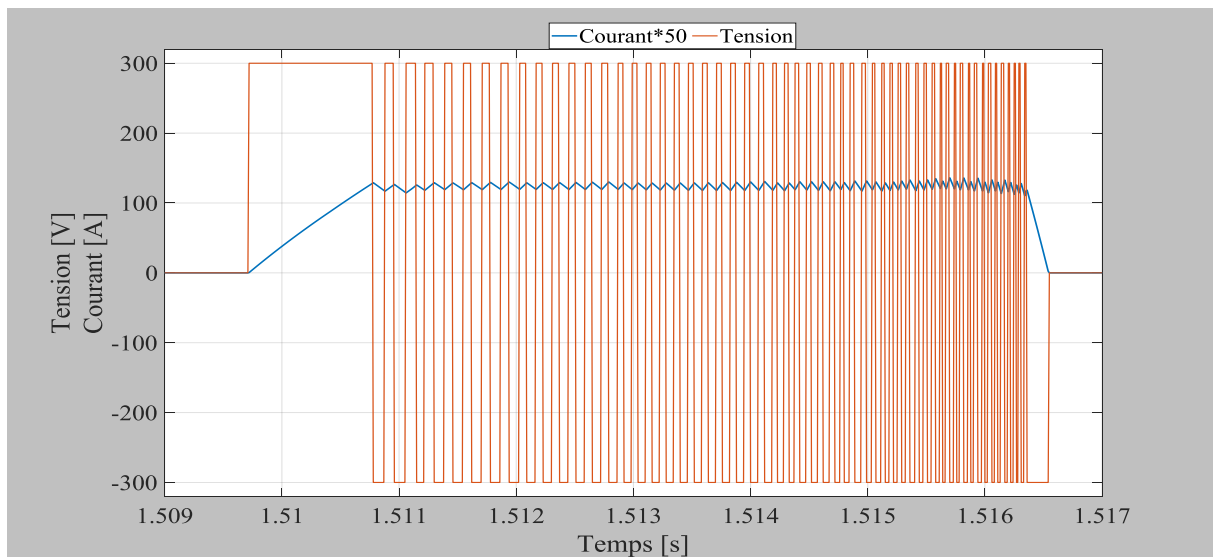


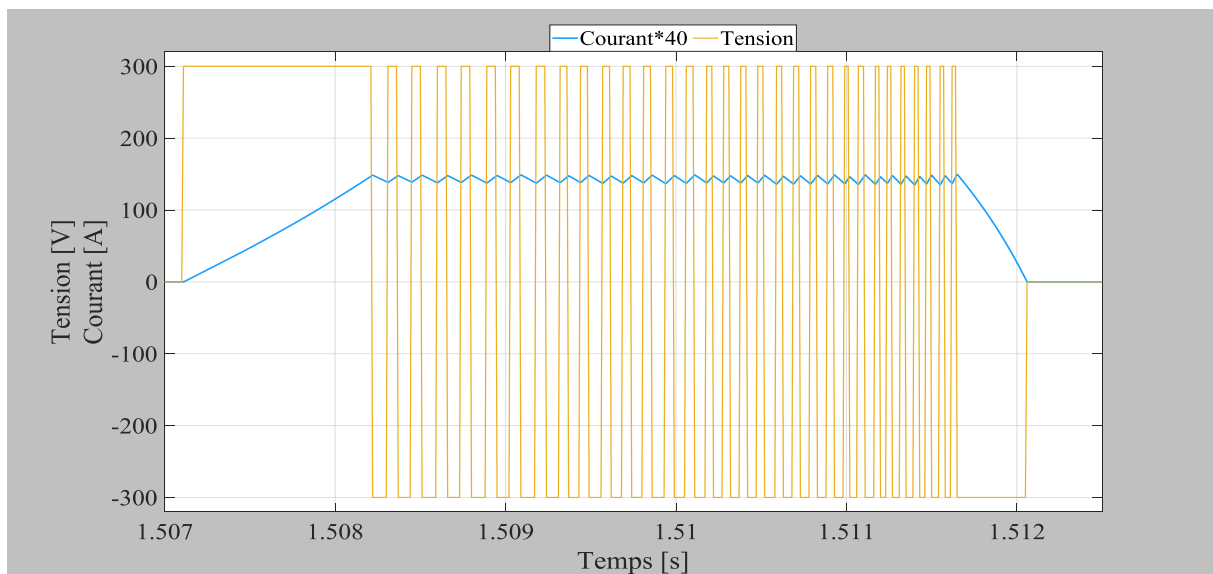
Figure. III.20 La vitesse mécanique de la GRV

L'allure de vitesse mécanique de la turbine est indiquée dans la figure (III.20). Après l'instant $t=1$ s, la courbe devient autour de 50 rad/s cependant la vitesse égale 100 rad/s après l'instant $t=2$ s, aussi après l'instant $t=4$ s la courbe devient autour de 150 rad/s donc, l'augmentation de vitesse est évidemment due au fait que la vitesse de vente est augmentée là où la puissance générée par la turbine est également augmentée.

Dans ce qui suit, les résultats seront traités avec la variation des angles de commutation ($\theta_{on} = 19, \theta_{off}=38$) & ($\theta_{on} = 22, \theta_{off}=35$).



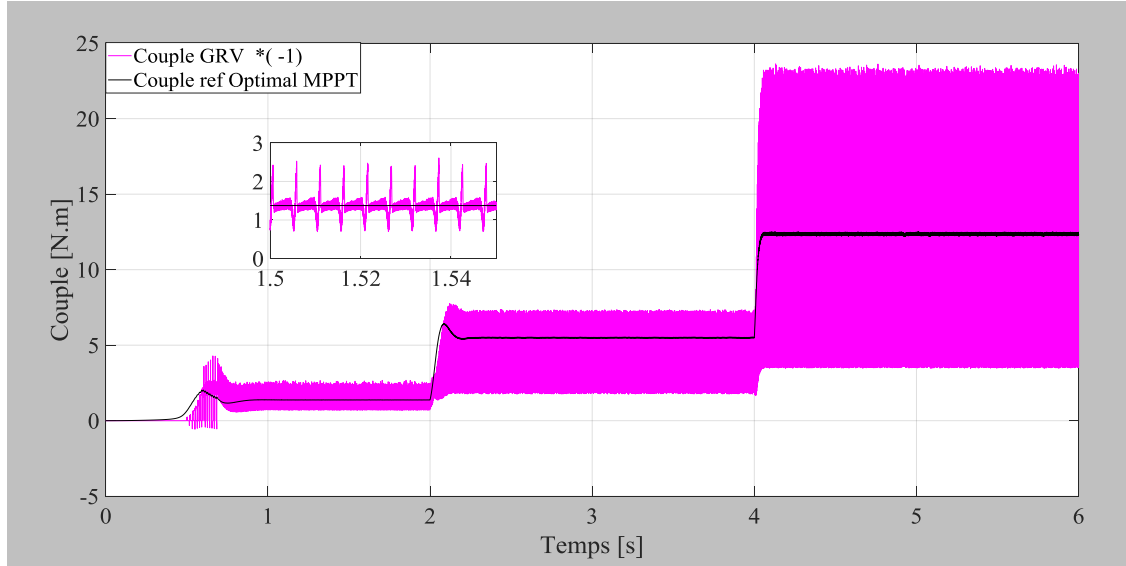
pour $\theta_{on} = 19$ & $\theta_{off} = 38$



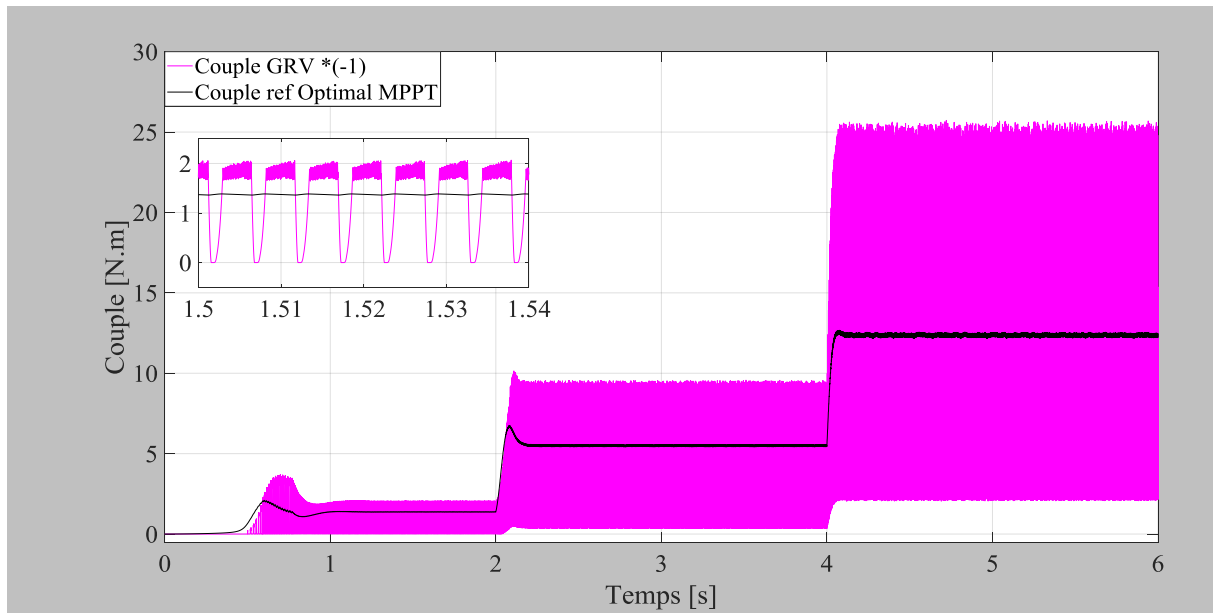
Pour $\theta_{on} = 22$ & $\theta_{off} = 35$

Figure. III.21 Tension d'alimentation et le courant électrique de la GRV.

Dans la Figure(III.21) la tension d'alimentation à partir de la batterie d'excitation et le convertisse électronique (le pont asymétrique), on a ici le réglage de la tension est varie selon la variation de la vitesse ce ci pour assure le courant de référence adapté avec le couple référence optimale pour générer la puissance maximale par la turbine.

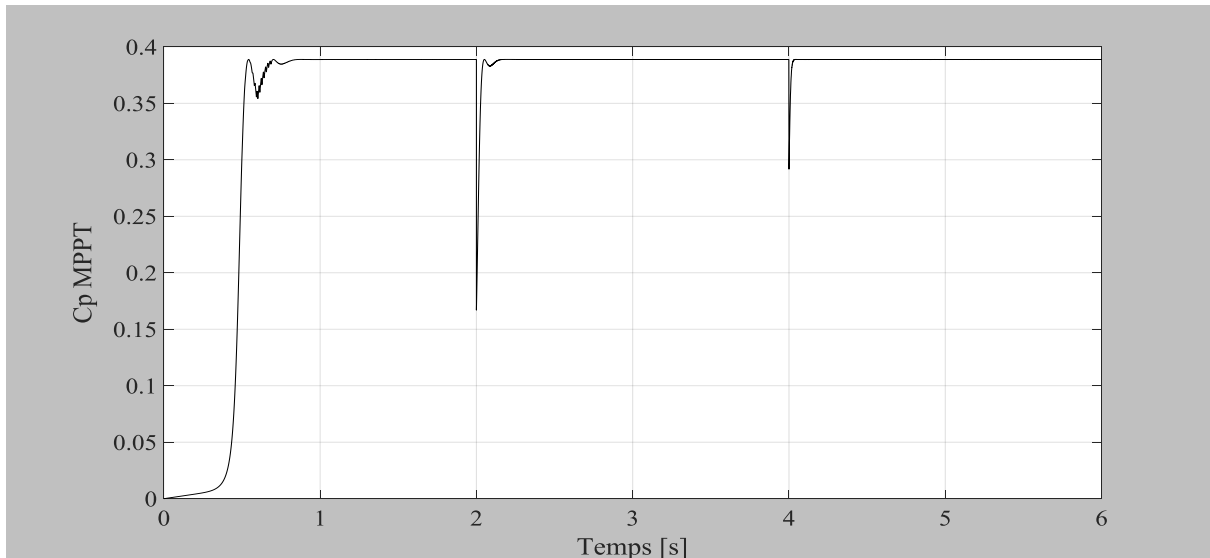


pour $\theta_{on} = 19$ & $\theta_{off} = 38$

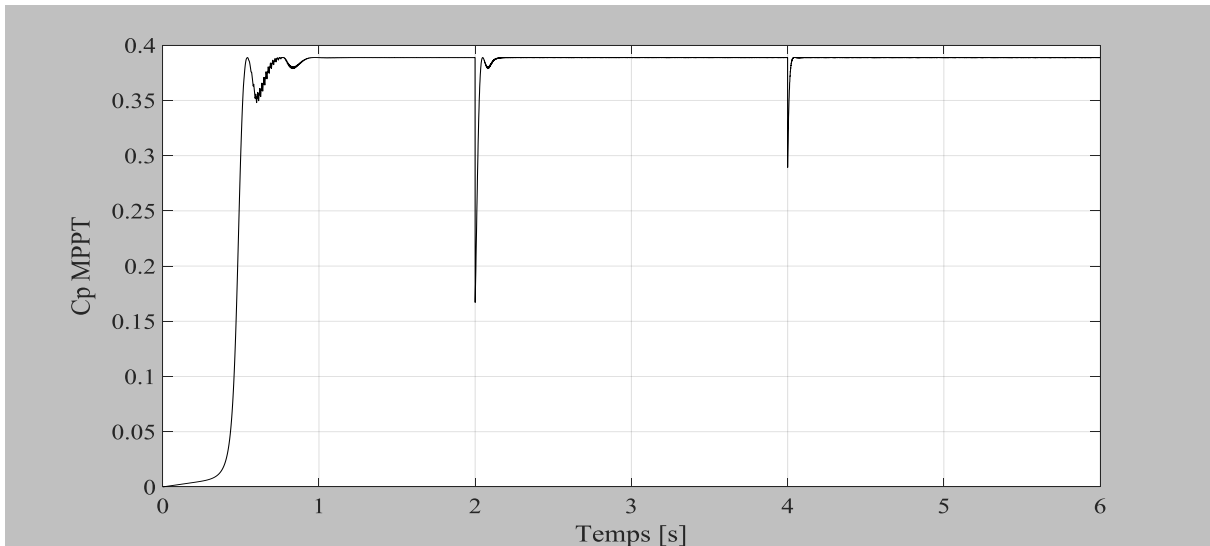


Pour $\theta_{on} = 22$ & $\theta_{off} = 35$

Figure. III.22 Couple référence optimal de MPPT et couple GRV



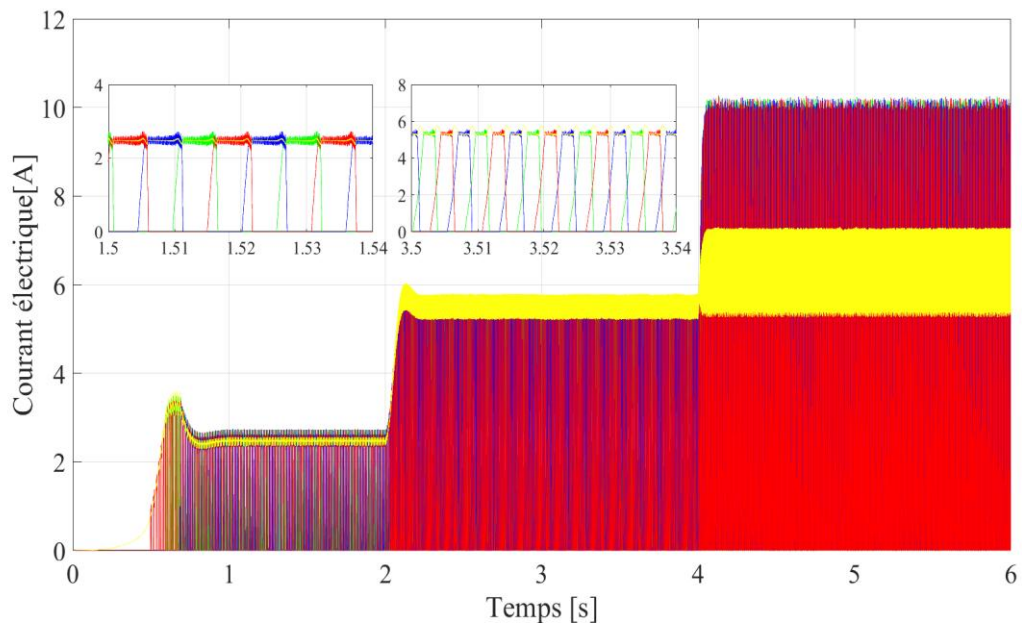
$\text{pour } \theta_{on} = 19 \& \theta_{off} = 38$



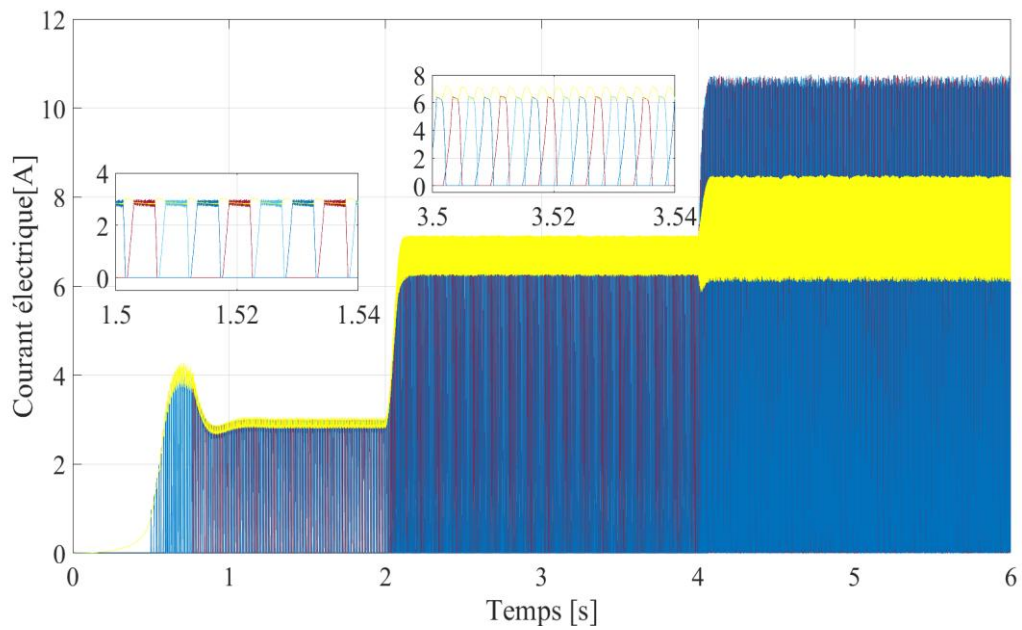
$\text{Pour } \theta_{on} = 22 \& \theta_{off} = 35$

Figure. III.23 Rendement de puissance MPPT pour la turbine associé à la GRV

La Figure(III.23)montre la courbe du coefficient de puissance pour la turbine éolienne. Bien que l'efficacité moyenne d'une telle éolienne soit normalement supérieure à 20 % jusqu'à 40%, elle varie considérablement avec la vitesse de vent comme vous pouvez le voir. L'efficacité mécanique de l'éolienne est la plus élevée (39 % dans ce cas) à une vitesse de vent d'environ selon le profile de la figure (III.19). Ici, le système de contrôle proposé est atteint à l'objectif de de maximiser l'efficacité du système éolien quelle que soit la vitesse du vent.

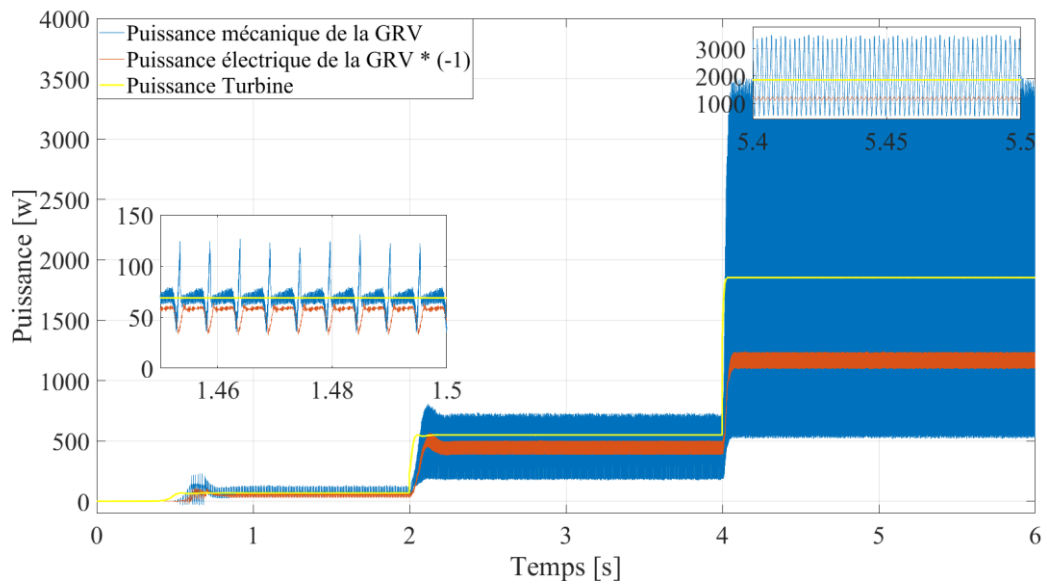


$\text{pour } \theta_{on} = 19 \& \theta_{off} = 38$

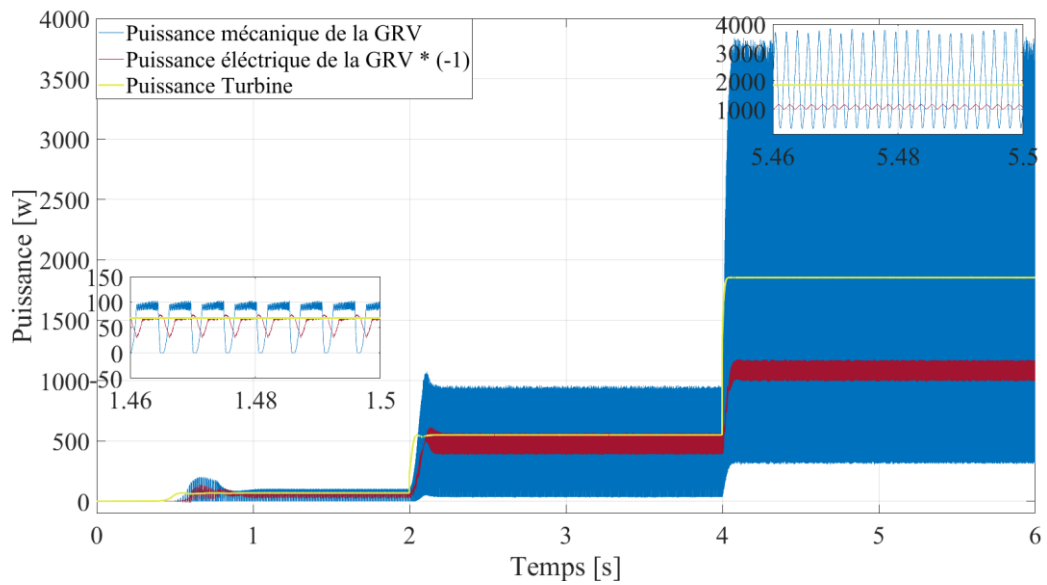


$\text{Pour } \theta_{on} = 22 \& \theta_{off} = 35$

Figure. III.24 Courant contrôlé par le comparateur d'hystérésis des trois phases de GRV 12/8



$\text{pour } \theta_{on} = 19 \& \theta_{off} = 38$



$\text{Pour } \theta_{on} = 22 \& \theta_{off} = 35$

Figure. III.25 Puissance GRV 12/8 & Turbine grâce au contrôle HCC associé à la technique MPPT

Les courbes des puissances est des graphes qui représente des différentes puissances des sorties de la turbine et la génératrice (Puissance mécanique à l'entrée de la génératrice et la puissance électrique de la génératrice) à différentes vitesses de vent et des angles de commutation ($\theta_{on}=19$, $\theta_{off}=38$) & ($\theta_{on}=22$, $\theta_{off}=35$).

En fine, on a constaté l'importance de la MPPT pour profiter le maximum de rendement par conséquence le maximum de puissance. Aussi, on a remarqué l'effet de variation les angles de commutation ($\theta_{on}= 19, \theta_{off}=38$) & ($\theta_{on}= 22, \theta_{off}=35$) sur le performance de couple donc la qualité de puissance. A cet effet, il faut le bien qui choisir les bonnes paramètres de contrôle pour une bonne fonctionnent.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales de l'énergie éolienne et la technique MPPT pour la turbine éolienne et leurs modelés mathématiques puis la simulation de ce système pour valider la technique utilisée. Ensuite, la stratégie de commande HCC de la GRV est détaillies par les stratégies de commutation possibles et le convertisseur électronique (pont asymétrique) et l'algorithme ou l'organigramme qui permet de contrôler le couple par la commande HCC. L'association a également été faite entre la technique de contrôle de couple de GRV par HCC avec la technique MPPT de la turbine afin de maximiser le rendement C_p de la turbine.

Différentes résultats des simulations du système de contrôle proposé ont été présentés en considérant dans le cas de contrôle MPPT pour différentes vitesse de vent également en fait varie les angles de commutation ($\theta_{on}, \theta_{off}$). Les résultats obtenus approuvent et valident l'efficacité du système de contrôle proposé, ils ont également présenté l'importance de l'effet de variation des angles de commutation ($\theta_{on}, \theta_{off}$) sur les performances de fonctionnement et la qualité de l'énergie produite par le GRV.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La Machine à Réductance Variable (MRV) est surtout appréciée pour sa simplicité et sa robustesse, bien que le principe de fonctionnement des machines à réductance variable soit connu depuis longtemps, ils n'ont connu de réel développement que récemment, grâce notamment aux puissants outils de calcul, aux performances des matériaux etc....

D'où notre intérêt pour ce thème que nous avons menée dans plusieurs directions :

- Nous savions différents types des MRV, le principe de fonctionnement et conversion d'énergie de système électromagnétique.
- Nous avons présenté les résultats relatifs aux caractéristiques électromagnétiques de la GRV 12/8 par le logiciel ANSYS et les résultats de simulation dynamique en mode génératrice par le logiciel MATLAB.
- D'autre part, nous savions l'importance de la chaîne complémentaire de la génératrice électrique, évidemment est la source d'énergie mécanique donc nous avons présenté une turbine éolienne avec la technique MPPT et leurs constitutions et principes de fonctionnement, après la modélisation de la chaîne de turbine MPPT nous avons fait la commande HCC de la GRV avec la présence de boucle de contrôle du couple ensuite l'association des dites techniques pour avoir la chaîne complète de GRV & turbine.

Les résultats de l'association de commande HCC avec la technique MPPT de la turbine sont présentés avec la variation de vitesse du vent également pour différents angles de mise sous et mise hors tension réalisés à l'aide des logiciels ANSYS et MATLAB/Simulink ont été analysés et ont montré la validité des modèles indiquent, l'efficacité de l'association proposée et l'effet de la variation des angles de commutation.

Enfin, la génératrice à VR approuve sa classe comme une candidature importante pour la concurrence dans le domaine des énergies renouvelables grâce à sa flexibilité et sa facilité de commande et de contrôle avec moins d'exigences et moins cher que ce soit pour la construction, l'entretien ou la maintenance.

Comme perspectives pour ce présent travail, nous envisageons :

- ✓ Utilisation des techniques de l'intelligence artificielle tel que réseaux de neurone et algorithmes d'optimisation pour déterminer les paramètres de contrôle optimaux pour améliorer la qualité et les performances de la puissance GRV.
- ✓ Développement d'une commande et contrôle sans capteur de position de la GRV.

Bibliographies

- [1] R. Krishnan, «Switched Reluctance Motor Drives», CRC Press, 2001.
- [2] T.Wildi, «Électrotechnique», Les presses de l'université Laval, 2008.
- [3] D . A. Torrey «Switched Reluctance Generators and Their Control», IEEE Transactions Industrial Electronics, vol.49, no.1, Feb. 2002.
- [4] J. M. Kokernak, D. A. Torrey, M. Kaplan «A switched reluctance starter/alternator for hybrid electric vehicles», Proc. PCIM'99,pp. 74-80, 1999.
- [5] B. Multon, «Conception Et Alimentation Electronique Des Machines A Reluctance Variable A Double Saillance», Habilitation à Diriger des Recherches, 1994
- [6] G.Seguir, F. Notellet, «ElectrotechniqueIndustrielle», 2éme édition pages 371-384.
- [7] F.M. Sargos «Etude théorique des performances des machines à réluctance variable», Thèse de Doctorat, I.N.P.L, Mars 1981.
- [8] E. Hoang «Etude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance», Thèse ENS Cachan ,1995.
- [9] L. Moreau, «Modélisation, Conception et Commande de GRV »,Thèse Doctorat, l'Université. Nantes, 9 Dec 2005.
- [10] A. Dekhinet, S. Taïbi «Conception d'une structure de MRV de type vernier à rotor lisse excitée : pré-dimensionnement et étude des performances », 5th International Conference on Electrical Engineering Batna, 27-29 ,2008.
- [11] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaim, G. Barakat, N. Takorabet, C. Chillet, D. Matt, S. Taïbi, A. Tounzi, C. Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, «Comparaison De Structures Electromagnetiques Pour Des Applications A Faible Vitesse Et Fort Couple», RS Série RIGE, maîtrise de l'énergie électrique»,pp 259 à 286. 2005.
- [12] S. TAIBI «Contribution à l'étude, la conception, le dimensionnement et l'optimisation des machines à réluctance variable de type vernier», Thèse de Doctora de l'Université des sciences et technologies de Lille, 2002.

- [13] B.S.Jean «Electrotechnique et machines électriques », édition eyrolles, paris. Isbn 10 : 0776256513, 1976
- [14] O. Darrigol «Les équations de Maxwell: de Mac Cullagh à Lorentz»,Belin, Isbn 2-7011-3075-1, 2005
- [15] G.B.Mariani «Machine synchrone à réluctance – Modèles équivalents à réseau de réluctances pour la simulation et l'optimisation», Thèse de Doctorat, Université de Grenoble. 2016
- [16] Li. Li, «Etude et mise au point d'une nouvelle famille d'alternodémarreurs pour véhicules hybrides et électriques», Thèse de Doctorat, Université de Grenoble,2011
- [17] V. Reinbold «Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour véhicules hybrides optimisation conjointe des composants et de la gestion d'énergie », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2014
- [18] M.Chouitek «Commande d'un Moteur à Reluctance Variable par l'Emploi de l'Intelligence Artificielle», Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf ,2017
- [19] M. Ehsani, «Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues»,IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No 1, January/February 2000.
- [20] S. taïbi, I. Haouara, A. Tounzi, F. Piriou, « Etude de MRV excitées pour des applications en entraînement direct », CEMD'99, Cachan 4 février 1999.
- [21] J. Faiz, B. Ganji, R. W. De Doncker, J. O. Fiedler, «Electromagnetic Modeling of Switched Reluctance Motor Using Finite Element Method»,IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on, pp. 1557-1562, 6-10 Nov 2006.
- [22] C. Labiod, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable», mémoire de magister, Université de Biskra, 2014.
- [23] C. Labiod, « Contribution à la modélisation dynamique à base d'éléments finis, au contrôle et à l'optimisation des machines à reluctance variable », mémoire de Doctorat, Université de Biskra, 2018

- [24] Y.Amara «Modélisation pour le dimensionnement des machines électriques Application à des machines spéciales», Thèse de Doctorat, Université Paris XI, 2012.
- [25] T. A. Barros, P. J. Neto, P. S. Filho, A. B. Moreira, and E. Ruppert «Approach for performance optimization of switched reluctance generator in variable-speed wind generation system», Renewable Energy, vol. 97
- [26] I.AGHA,R. Belhadj, « Analyse Des Performances Dynamiques Des Fermes Eoliennes A Base Des Machines Asynchrones A Double Alimentation », Mémoire en réseaux électriques, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [27] H. D. Nedjari, S. Haddouche, A. Balehouane , O. Guerri,« Atlas vent de l’Algérie à 10m du sol », 2014
- [28] M. Mehadjia « Commande Non Linéaires De La Une Machine Asynchrone à Double Alimentation Utilisée Dans Une Chaîne De Conversion D’énergie Eolienne à Vitesse Variable », Mémoire de Fin d’Etude, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [29] T. Saci « Étude de stockage inertiel d’énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister, Université Bejaia, 2008.
- [30] A.Saki, M.Belaidi «Etude d’un Générateur Asynchrone dans La Production d’Energie Electrique par Eolienne», Thèse de d’ingéniorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [31] O.Djaafri, A.E.Harizi « Modélisation, simulation et contrôle d’une turbine éolienne» Université Mohamed Boudiaf - M’Sila 2017
- [32] F.Dehoum,L.Djeddou,H.Chariat «Commande vectorielle d’une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l’utilisation de l’énergie éolienne», Thèse de d’ingéniorat, Université Mohamed Boudiaf M’sila, 2011
- [33] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, Etat de l’art des aérogénérateurs, Ouvrage collectif « L’électronique de puissance vecteur d’optimisation pour les énergies renouvelables », Ed. NOVELECT - ECRIN, mai 2002, pp.97-154

- [34] S.E.Ziraoui « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau», Thèse de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017
- [35] A.H.Mesai, K.Nadir, « Commande de La Machine Asynchrone à Double Alimentation – Apport des Techniques de L'intelligence Artificielle », Mémoire de Fin d'Etude, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [36] Z.L.Boudjema « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2015.
- [37] M. Massaoud « contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister, Université Batna, 2008
- [38] B. MEGHNI, A. Saadoun, Y. AMIRAT, D. Dib «Maximum power extraction (SMC, P&O) from wind energy system based on reliable control», Revue des Sciences et de la Technologie - RST-, vol. Volume 6 N°1 / janvier 2015, pp. 70-84, 2015
- [39] M. Naima « Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée » Mémoire de Magistère, Université de Batna, 2004
- [40] C. Labiod, K. Srairi, B. Mahdad, M. T. Benchouia, M.E.H. Benbouzid «Speed control of 8/6 switched reluctance motor with torque ripple reduction taking into account magnetic saturation effects»,Energy Procedia, Vol. 74, pp. 112 – 121,2015
- [41] C. Labiod, M. Bahri, K. Srairi, B. Mahdad, M. T. Benchouia, M. E. H.Benbouzid, «Static and dynamic analysis of non-linear magnetic characteristics in switched reluctance motors based on circuit-coupled time stepping finite element method»,Int J System Assur Eng Manag Vol. 8, No. Supp 1.1, pp. 47-55, 2017.
- [42] C. Labiod, K. Srairi, B. Mahdad, A. Dib, M. T. Benchouia, M. E. H. Benbouzid, Bibliographie 9295 «Optimum Performances for Non-linear Finite Elements Model of 8/6 Switched Reluctanc Motor Based on Intelligent Routing Algorithms», Advances In Electrical And Electronic Engineering (AEEE), Vol. 15, No. 1, pp. 1-1, 2017.