



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



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Electrotechnique

N° de série :

N° d'ordre :

Thèse

*Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3^{ème} cycle
en Electrotechnique*

Option : ELECTROTECHNIQUE

Présentée par :

LEBSIR Abdelkadir

Master en Electrotechnique

Thème

**Performances Comparées de Machines Synchrones à
Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à
une Chaine de Conversion d'Energie Renouvelable**

Soutenue le, 29/05/2016

Devant le Jury :

<i>Président :</i>	Hocine Benalla	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine
<i>Encadreur :</i>	Ammar Bentounsi	Professeur	Ecole Nat. Polytechnique Constantine
<i>Co-encadreur :</i>	Mohamed Benbouzid	Professeur	Université de Brest, CNRS, France
<i>Examineur 1 :</i>	Housseem Bouchekara	M.C. 'A'	Université des Frères Mentouri Constantine
<i>Examineur 2 :</i>	Rachid Abdessemed	Professeur	Université de Batna 2
<i>Examineur 3 :</i>	Said Drid	Professeur	Université de Batna 2

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse de doctorat ont été réalisés selon une formule de co-direction au sien du **Laboratoire de Génie Electrique de Constantine (LGEC)** à l'Université des Frères Mentouri de Constantine, Algérie, et du **l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (FRE CNRS 3744 IRDL)** de l'Université de Bretagne Occidentale à Brest, France.

Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude envers mes deux co-directeurs de thèse, le Professeur **Ammar BENTOUNSI** de l'Ecole Nationale Polytechnique de Constantine et le Professeur **Mohamed-El-Hachemi BENBOUZID** de l'Université de Bretagne Occidentale de Brest, pour m'avoir guidé et conseillé tout au long de mes travaux de recherche.

Mes sincères remerciements aussi à Messieurs les membres du jury :
Le Professeur **Hocine Benalla** du Département d'Électrotechnique de l'Université des Frères Mentouri de Constantine qui nous a fait l'honneur de présider ce jury.
Les Professeurs **Rachid Abdessemed** et **Said Drid** de l'Université de Batna et le **Dr. Housseem Bouchekara** de l'Université des Frères Mentouri de Constantine d'avoir répondu spontanément à notre invitation pour examiner ce travail.

Toute ma gratitude aussi envers mes enseignants de l'Université des Frères Mentouri pour le savoir qu'ils m'ont inculqué.

A mes très chers Parents mon profond respect à mes Frères et mes Sœurs ma reconnaissance pour leur encouragement.

À tous ceux, nombreux, que je n'ai pas nommés ici je dirai **MERCI !**

A.kadir LEBSIR

Liste des publications

L'ensemble de nos travaux de thèse de doctorat ont été valorisés par cinq communications dans des conférences internationales et deux publications dans des revues indexées (dont une en cours d'édition chez ELECTROMOTION).

Ces communications scientifiques sont listées ci-dessous :

POWERENG'2013

4th IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives

"Comparative Study of PMSM and SRM Capabilities"

May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey

A. Lebsir, A. Bentounsi, R. Rebbah, S. Belakehal, M.E.H. Benbouzid

POWERENG'2013

4th IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives

"Compared Applications of Permanent Magnet and Switched Reluctance Machine: State of the Art"

May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey

A. Lebsir, R. Rebbah, S. Belakehal, A. Bentounsi

SPEEDAM'2014

22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion

"Modeling and Analysis of a Salient Poles Synchronous Machines Using Finite Elements Method"

June 18-20, 2014, ISCHIA, Naples - Italy

A. Lebsir, R. Rebbah, M. Larakeb, H. Djeghloud, A. Bentounsi

ICEE'2014

The Second International Conference on Electro-Energy ICEE 2014

"Innovative Electrical Machine for Wind Turbine"

November 09–11, 2014, Skikda, Algeria

A. Lebsir, A. Bentounsi, M.E.H. Benbouzid, H. Mangel

CISTEM'2014

International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb CISTEM 2014

"Soft magnetic materials for SRM: finite element analysis and perspective"

November 03–06, 2014, Tunis.

F. Rebahi, A. Bentounsi, **A. Lebsir**, T. Benamimour

JES -- Journal of Electrical Systems: Volume 11, Issue 3, (September 2015)

" Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study "

A. Lebsir, A. Bentounsi, M.E.H. Benbouzid, H. Mangel

http://journal.esrgroups.org/jes/papers/11_3_4.pdf

Copyright © JES 2015 on-line : journal/esrgroups.org/jes

En cours d'édition chez ELECTROMOTION: Volume 23, (Juin 2016):

" Switched Reluctance Generator Models for Wind Turbine Systems "

A. Lebsir, M.E.H. Benbouzid, A. Bentounsi, I. BenSalah

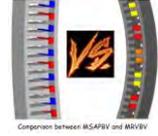


Table Des Matières

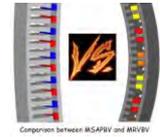
Remerciements	i
Liste des publications	ii
Table des matières	iii
Listes des figures	vii
Listes des tableaux	xii
Acronymes et abréviations	xiii
Introduction Générale	xiv

CHAPITRE I:

Etat de l'Art des Aérogénérateurs Electriques

& Etude Comparative

I.1 Introduction	02
I.2 Domaines d'application des machines électriques	02
I.3 Etat de l'Art	05
I.4 L'énergie éolienne	07
I.4.1 Configuration de l'énergie éolienne	07
I.4.2 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne	08
I.4.3 Caractéristiques du générateur éolien	10

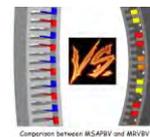


I.4.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	12
I.5 Etude Comparative	12
I.5.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Écureuil (GACE)	12
I.5.2 Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA)	15
I.5.3 Générateur Synchrone à Aimant Permanent (GSAP)	17
I.5.4 Générateur à Reluctance Variable (GRV)	19
I.5.5 Applications industrielles	21
I.5.6 Conclusion préliminaire et perspectives	22
I.6 Conclusion	23

CHAPITRE II:

Etude et Conception d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent à Basse Vitesse (MSAPBV) associée à une Éolienne de 1.5 MW

II.1 Introduction	25
II.2 Spécifications de la turbine éolienne entraînant l'aérogénérateur	25
II.3 Différentes topologies de MSAP	27
I.3.1 Rotor avec aimants en surface	28
I.3.2 Rotor avec aimants insérés	29
I.3.3 Rotor avec aimants enterrés	29
I.3.4 Rotor avec aimants à concentration de flux	29
I.3.5 Les aimants permanents	30
II.4 Caractéristiques principales de la MSAP étudiée	31
II.5 Dimensionnement analytique de la MSAPBV	34
II.5.1 Modèle analytique & équation de dimensionnement	34
II.5.2 Calcul des volumes et masses des différentes parties de la MSAPBV	38

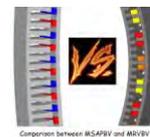


II.5.2.1	Volume et masse du stator	38
II.5.2.2	Volume et masse du rotor	40
II.5.2.3	Masse totale de la MSAPBV	40
II.5.3	Analyse des résultats analytiques	41
II.6	Simulation numérique par éléments finis	45
II.6.1	Méthodes numériques	45
II.6.2	Principe de la méthode des éléments finis	46
II.6.3	Equations électromagnétiques	47
II.6.4	Modèle de la MSAPBV étudiée	49
II.6.5	Analyse des résultats numériques	51
II.7	Conclusion	52

CHAPITRE III:

Etude et Conception d'une Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse (MRVBV) de 1.5 MW pour Éolienne

III.1	Introduction	54
III.2	Spécifications et structure du système éolien	54
III.3	Généralités sur les MRV	54
III.3.1	Principe de fonctionnement	54
III.3.2	Différentes structures de MRV	60
III.3.2.1	MRV Pures	60
III.3.2.2	MRV Vernier	61
III.3.2.3	MRV Hybrides	62
III.3.2.4	MRV à flux axial	63
III.4	Caractéristiques principales de la MRV étudiée	63
III.5	Dimensionnement analytique de la MRVBV	66



III.5.1 Équation de dimensionnement	66
III.5.2 Modèle analytique	70
III.5.3 Calcul des volumes et masses des différentes parties de la MRVBV	73
<i>III.5.3.1 Volume et masse du stator</i>	73
<i>III.5.3.2 Volume et masse du rotor</i>	74
<i>III.5.3.3 Masse totale de la MRVBV</i>	74
III.5.4 Analyse des résultats analytiques	75
III.6 Simulation numérique par éléments finis	80
III.6.1 Modèle de la MRVBV étudiée	80
III.6.2 Résultats graphiques	81
III.7 Conclusion	83
 <u>CHAPITRE IV:</u> 	
<i><u>Performances Comparées de MSAPBV et MRVBV</u></i>	
IV.1 Introduction	85
IV.2 Étude basique des équations de dimensionnement	85
IV.3 Comparaison des dimensions analytique	86
IV.4 Comparaison des volumes et masses	88
IV.5 Comparaison des couts	89
IV.6 Performances comparées	90
IV.7 Conclusion	91
 Conclusions Générale	 92
 Bibliographies	 a-k

Liste Des Figures

Figure -I.1- Fréquence d'utilisation des ME en fonction du domaine d'application	04
Figure -I.2- Candidats potentiels dans l'énergie éolienne	06
Figure -I.3- Conception d'éolienne à AHWT et AVWT	07
Figure -I.4- Sous-systèmes d'éolienne à AHWT	08
Figure -I.5- profil typique du vent page	09
Figure -I.6- Coefficient de puissance C_p pour différentes éoliennes	10
Figure -I.7- Courbe de puissance typique d'une éolienne	11
Figure -I.8- Schéma d'un système de production éolienne avec GACE	13
Figure -I.9- Caractéristiques d'une machine à induction typique	14
Figure -I.10- Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE) industriel pour éolienne ...	15
Figure -I.11- Générateur asynchrone à double alimentation (GADA) industriel pour éolienne du fabricant REpower	15
Figure -I.12- Schéma d'un système de production éolienne avec GADA	16
Figure -I.13- Caractéristiques d'une GADA couple-vitesse	17
Figure -I.14- (TheSwitch) générateur synchrone aimant permanent (GSAP) industriel	18
Figure -I.15- Caractéristique typique couple-vitesse d'un moteur à réluctance variable	20
Figure -I.16- Stator et rotor d'une machine à réluctance variable de 20 kW	20

Liste Des Figures

Figure -II.1- Éolienne à axe horizontal à entraînement direct (EHED)	26
Figure -II.2- Différentes structures rotoriques pour une MSAP classique	28
Figure -II.3- Courbe de désaimantation	30
Figure -II.4- Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants	31
Figure -II.5- Vitesse du rotor versus la vitesse du vent pour une éolienne de 2 MW	32
Figure -II.6- Organigramme des différentes étapes de la démarche de conception	33
Figure -II.7- Principales dimensions du prototype de MSAPBV	37
Figure -II.8- Masses des parties actives de la MSAPBV (Kg)	42
Figure -II.9- Coûts des parties actives de la MSAPBV (€)	43
Figure -II.10- Masses des matériaux actifs de la MSAPBV	44
Figure -II.11- Coûts des parties actives de la MSAPBV	44
Figure -II.12- Eléments de référence du 1 ^{er} ordre	47
(a) Eléments 1D (b) Eléments 2D (c) Eléments 3D	47
Figure -II.13- Structures de la MSAPBV en 2D	50
Figure - II.14- Maillage du domaine d'étude en 2D	50
Figure - II.15- Distribution des lignes de champ magnétique	51
Figure - II.16- Distribution de la densité de flux magnétique	51
Figure -II.17- Comparaison analytico-numérique des masses des parties actives	52

Liste Des Figures

Figure -III.1- Structure élémentaire de la MRV monophasé	56
(a) Position d'opposition	56
(b) Position de conjonction	56
Figure -III.2- Schéma monophasé équivalent	57
Figure -III.3- Conversion d'énergie dans une MRV	58
Figure -III.4- Régimes de fonctionnement de la MRV	59
Figure -III.5- Fonctionnement générateur	59
(a) magnétisation	59
(b) génération	59
Figure -III.6- Onduleur triphasé asymétrique	60
Figure -III.7- (a) MRV à 2 dents par phase	60
Figure -III.7- (b) MRV à 4 dents par phase	61
Figure -III.7- (c) MRV à pôles statoriques dentés	61
Figure -III.8- Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance	62
Figure -III.9- MRV hybride à effet Vernier	63
Figure -III.10- MRV à plots aimantés	63
Figure -III.11- Organigramme des différentes étapes de notre démarche	65
Figure -III.12- Représentation schématique 2D d'une MRV 6/4	66
Figure -III.13- Caractéristiques magnétiques flux-courant de la MRV 6/4	67
Figure -III.14- Principales dimensions du prototype de MRVBV	70
Figure -III.15- Masses de chaque partie du stator et du rotor (Kg)	78
Figure -III.16- Masses des parties actives de la MRVBV (Kg)	78
Figure -III.17- Coûts des parties actives de notre MRVBV (€)	79
Figure -III.18- Masses des matériaux de la MRVBV	79

<i>Figure -III.19- Coût des parties actives de la MRVBV</i>	80
<i>Figure -III.20- Structures de la MRVBV en 2D</i>	81
<i>Figure -III.21- Maillage du domaine d'étude en 2D</i>	81
<i>Figure -III.22- Distribution des lignes de champ magnétique</i>	82
<i>Figure -III.23- Distribution des lignes de champ magnétique en opposition</i>	82
<i>Figure -III.24- Distribution de la densité de flux magnétique</i>	82
<i>Figure -III.25- Distribution de la densité de flux magnétique en opposition</i>	83

Liste Des Figures

<i>Figure -IV.1- Vue complète de la MSAPBV en 3D</i>	<i>87</i>
<i>Figure -IV.2- Vue complète de la MRVBV en 3D</i>	<i>87</i>
<i>Figure -IV.3- Comparaison des poids des deux machines (kg)</i>	<i>88</i>
<i>Figure -IV.4- Comparaison des coûts des deux machines</i>	<i>90</i>

Liste Des Tableaux

Tableau I.1. Comparaison de ME selon différentes applications	05
Tableau I.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	12
Tableau I.3. Les principaux fabricants d'éoliennes	21
Tableau I.4. Évaluation des systèmes éoliennes	23
<hr/>	
Tableau II.1. Éolienne WP 1.5-MW de NREL	25
Tableau II.2. Comparatif propriétés systèmes éoliens avec multiplicateur (<i>Gearbox</i>) et entraînement direct (<i>Direct-Drive</i>)	26
Tableau II.3. Paramètres de conception associés à la MSAPBV	32
Tableau II.4. Dimensions des encoches	38
Tableau II.5. Principales dimensions géométriques du prototype de MSAPBV	41
Tableau II.6. Principales dimensions géométriques d'une encoche	41
Tableau II.7. Masses des parties actives de la MSAPBV	42
Tableau II.8. Coûts des matériaux actifs	43
<hr/>	
Tableau III.1. Paramètres de conception associés et fixés pour la MRVBV	64
Tableau III.2. Principales dimensions géométriques du prototype de la MRVBV	75
Tableau III.3. Principales dimensions de bobinage	76
Tableau III.4. Masse des parties actives de notre MRVBV	77
<hr/>	
Tableau IV.1. Comparaisons des dimensions principales des deux machines	86
Tableau IV.2. Comparaisons des volumes et poids des deux machines	88
Tableau IV.3. Comparaisons des coûts des deux machines	89
Tableau IV.4. Comparaison de MSAPBV avec MRVBV pour une vitesse identique	91

Acronymes et Abréviations

- AHWT : Wind Turbine à Axe Horizontal ;
- AVWT : Wind Turbine à Axe Vertical ;
- AP : Aimants Permanent ;
- CP : Coefficient de Puissance ;
- EnR : Energie Renouvelable ;
- EHED : Eolienne à Axe Horizontale à Entraînement Direct ;
- EDP : Equations aux Dérivées Partielles ;
- IM : Machine à Induction ;
- GADA : Générateur Asynchrone à Double Alimentation ;
- GACE : Générateur Asynchrone à Cage D'écureuil ;
- GSAP : Générateur à Aimants Permanents ;
- GRV : Générateur à Reluctance Variable ;
- MCC : Machine à Courant Continu ;
- MEF : Méthodes des Eléments Finis ;
- ME : Machines Electriques ;
- MRVBV : Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse ;
- MSAPBV : Machine Synchrone à Aimants Permanents à Basse Vitesse ;
- VH : Véhicule Electrique ;

Introduction générale

Actuellement, les machines les plus utilisées dans les applications industrielles sont les machines asynchrones, les machines synchrones à rotor bobiné ou à aimant permanent et, récemment, les machines à reluctance variable. Ces machines réversibles, outre qu'elles sont utilisées en fonctionnement moteur à vitesse élevée, trouvent de plus en plus de créneaux dans des applications à faible vitesse et à fort couple comme les éoliennes à attaque directe (sans multiplicateur de vitesse).

Les énergies renouvelables ou EnR (solaire, éolienne, ...) ne représentent actuellement qu'environ 20 % de la production mondiale d'électricité; en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2 % ! Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un développement durable (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles, ...), les défis du futur énergétique nécessiteraient le développement des EnR comme sources de substitution, propres et inépuisables.

Parmi ces énergies de substitution, la filière éolienne connaît un taux de développement très élevé. L'énergie éolienne ou du vent est un concept qui est apparu au Moyen-âge en Europe où le mot « éolienne » a été utilisé pour la première fois en 1885 (dérivé du mot *Eole* dieu du vent) comme nom commun ("*éoliennes produisant de l'électricité*") et non plus comme un adjectif ("*énergie éolienne*"). Le mot se retrouve dans le Larousse quelques années plus tard en 1907. En effet, c'est une énergie qui a de nombreux avantages : non polluante, gratuite, illimitée à l'échelle humaine et dont le prix de revient est le moins cher parmi les autres types d'EnR.

La problématique de notre thèse de doctorat se situe au niveau de l'étude de générateurs innovants adaptés à la conversion des énergies renouvelables, particulièrement de l'énergie éolienne. Il s'agira, dans une première phase, de faire un état de l'art des différentes solutions existantes grâce à une recherche bibliographique. Ceci permettra d'établir des statistiques comparatives en matière d'applications entre les différentes machines, notamment les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et les machines à réluctance variables (MRV) sur lesquelles nous avons axé notre étude.

La deuxième partie sera consacrée au dimensionnement d'une *Machine Synchrone à Aimants Permanent à Basse Vitesse (MSAPBV)*, donc à grand nombre de pôles et à grand diamètre, à associer à une turbine éolienne de puissance élevée par entraînement direct (*direct-drive*), sans boîte de vitesses. Après une brève description du système éolien étudié, nous présenterons les différentes topologies de machines synchrones fréquemment utilisées comme aérogénérateurs avant de fixer notre choix sur une structure donnée. Il s'agira ici d'une machine synchrone à aimants permanent a basse vitesse que nous allons dimensionner analytiquement, moyennant un cahier des charges spécifiant notamment la puissance (1.5 MW) et la vitesse (1.55 rad/s). Après avoir calculé les dimensions principales de la MSAPBV à partir d'un modèle analytique, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice à partir d'une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis. Les différentes simulations ont été effectuées grâce à un code de calcul que nous avons réalisé sous MATLAB couplé au logiciel éléments finis FEMM.

La troisième partie traitera du dimensionnement d'une autre topologie d'aérogénérateur innovant qu'est la *Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse (MRVBV)*, donc à grand nombre de pôles et à grand diamètre. Nous présenterons les différentes topologies de MRV fréquemment utilisées dans l'industrie avant de fixer notre choix sur une structure donnée que nous allons dimensionner analytiquement moyennant l'équation de dimensionnement des

machines électriques (avec des hypothèses à préciser) et un cahier des charges spécifiant notamment la puissance (1.5 MW) et la vitesse (1.55 rad/s) comme pour la MSAPBV. Après avoir calculé les dimensions principales de la MRVBV à partir d'un modèle analytique, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice à partir d'une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis grâce à un code de calcul que nous avons réalisé sous MATLAB couplé au logiciel éléments finis FEMM.

Dans le dernier chapitre, nous effectuerons une analyse comparative des équations de dimensionnement, des volumes, masses et coûts des deux différentes topologies d'aérogénérateurs étudiées (*MSAPBV* et *MRVBV*). La comparaison est réalisée en ne tenant compte que des seules parties actives des machines. Nos travaux se sont essentiellement axés sur la génératrice à aimants permanents car cette machine semble être la plus rentable et la plus utilisée ces dernières années. Cependant, grâce aux développements réalisés dans différents domaines (électronique de puissance et de commande, modèles et logiciels de simulation, matériaux, ...) et avec le coût relativement élevé de la partie aimants de la MSAP, la génératrice à reluctance variable intéresse de plus en plus de chercheurs et industriels pour des applications éoliennes.

Etat de l'Art des Aérogénérateurs Electriques

Up-to-date

CHAPITRE I

Etat de l'Art des Aérogénérateurs Electriques **& Etude Comparative**

I.1 Introduction	02
I.2 Domaines d'application des machines électriques	02
I.3 Etat de l'Art	05
I.4 L'énergie éolienne	07
I.4.1 Configuration de l'énergie éolienne.....	07
I.4.2 Chaine de conversion de l'énergie éolienne	08
I.4.3 Caractéristiques du générateur éolien	10
I.4.4 Avantages et Inconvénients de l'Energie Eolienne	12
I.5 Etude comparative	12
I.5.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Écureuil (GACE)	12
I.5.2 Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA)	15
I.5.3 Générateur Synchrone à Aimant Permanent (GSAP)	17
I.5.4 Générateur à Reluctance Variable (GRV)	19
I.5.5 Applications Industrielles	21
I.5.6 Conclusion préliminaire et perspectives	22
I.6 Conclusion	23

I.1 Introduction

L'avènement de la conversion électromagnétique d'énergie en 1819 a contribué à la mise au point technologique de différentes machines électriques [1-3]. Actuellement, les machines les plus utilisées dans les applications industrielles sont les machines asynchrones, les machines synchrones à rotor bobiné ou à aimant permanent et, récemment, les machines à réluctance variable [4-5]. Ces machines réversibles, outre qu'elles sont utilisées en fonctionnement moteur, trouvent de plus en plus d'applications dans les EnR, notamment dans la conversion de l'énergie éolienne qui connaît un taux de développement très élevé !

L'énergie du vent est un concept qui est apparu au Moyen-âge en Europe où le mot « éolienne » est utilisé pour la première fois en 1885 (dérivé du mot *Eole* dieu du vent) comme nom commun ("*éoliennes produisant de l'électricité*") et non plus comme un adjectif ("*énergie éolienne*"). Le mot se retrouve dans le Larousse quelques années plus tard en 1907.

Ce premier chapitre est une étude comparative entre différents types de générateurs potentiels candidats pour la conversion d'énergie éolienne. Cette étude est fondée sur un examen exhaustif de l'état de l'art ainsi que sur une comparaison efficace des performances de trois grands générateurs classiques utilisés dans un système éolien, à savoir: (i) générateur asynchrone double alimentation (GADA); (ii) générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE); (iii) générateur synchrone à aimant permanent (GSAP); (iv) générateur à réluctance variable (GRV).

I.2 Domaines d'application des machines électriques

Le choix d'une machine pour une application et un cahier des charges donnés demeure un problème complexe. Il s'agira, par exemple, de réunir des critères tels que : bon rendement, peu encombrante, économique, fiable, peu de bruit acoustique, ... Nous définirons plus loin des critères de choix permettant d'effectuer un comparatif entre différents types de machines. Les machines synchrones à aimants permanents et à réluctance variable ont été déjà comparées dans divers articles.

L'étude [6] comparative de deux moteurs triphasés de même couple (100 N.m), puissance max. (26 kW) et travaillant à des vitesses de 2500 à 10000 tr/mn, un moteur synchrone à aimant montés en surface de type ferrite et un moteur à réluctance variable à double saillance type 6/4, basée sur un calcul analytique du couple moyen et des pertes joule, a conclu que le moteur à réluctance variable peut présenter des performances supérieures ou égales à celles du moteur à aimants à haute énergie.

Dans [7] un comparatif des performances de machines électriques mettant en œuvre trois principes de fonctionnements différents dans les mêmes conditions et possédant des structures très similaires de réalisation d'actionneurs à fort couple et puissance massique élevée, pour des applications d'entraînement directe, a été réalisé. Pour être valable, la comparaison doit être effectuée pour des niveaux de pertes joule et des fréquences de fonctionnement (à vitesse donnée 1000 tr/min) similaires.

[8] a effectué une comparaison entre quatre types de moteurs électriques destinés à des applications *véhicules électriques* [9]

Dans [10], les auteurs ont tenté de dégager et de comparer différentes solutions, industrielles ou en cours de développement, d'entraînement linéaires et tournants aussi bien directs qu'indirects. En particulier, les rendements, les performances massiques et dynamiques sont analysées à partir des lois de similitude et validées par des caractéristiques de machines électriques réelles. Il se dégage que la meilleure solution dans *le domaine de la robotique* est la machine synchrone autopilotée, en particulier à aimant, sans nul doute les plus performantes en terme de rendement massique et de performances dynamiques.

Dans le domaine de *l'aéronautique*, une comparaison des différents actionneurs électromécaniques pour la commande de vol électrique à vitesse variable a montré la faisabilité de l'utilisation des MSAP et des MRV pour leur tolérance aux pannes [5] [11].

Pour une application de *freins électriques* [12], une comparaison de deux technologies de moteurs MRV 8/6 et PM utilisant un aimant NdFeB avec des caractéristiques identiques de couple et vitesse (0.8 N.m et 1500 tr/min) a conclu que la MRV a des avantages de température et de coût réduits.

Quel moteur ayant un couple élevé est le mieux placé pour une application *de machine à laver* ? L'auteur [13] répond à cette question par une étude comparative entre différents moteurs classiques types MAS, MSAP, MRV.

La caractéristique de couple massique est particulièrement importante dans le cas des entraînements directs à basse vitesse soumis à de fortes contraintes de masse (générateurs éoliens, moteurs roues intégrés, ...) [14].

Dans [15] les constructeurs ont toujours essayé dans la mesure du possible de rendre leurs machines tolérantes aux pannes et de moindre coût de construction, ce qui a conduit à des machines plus efficaces en termes de rendement, de tenue en tension, de qualité de signaux,...

Actuellement, la conversion d'énergie dans *les centrales éoliennes* est principalement assurée par des génératrices synchrones ou asynchrones, couplées au rotor de la turbine par un multiplicateur mécanique de vitesse [3].

Les technologies d'aérogénérateurs électriques sont comparées sur la base de la topologie, du coût, du rendement et de la complexité de leur commande, où la machine synchrone à aimant permanent et la machine à réluctance variable sont des architectures attrayantes de conversion d'énergie éolienne par rapport aux machines à induction (IM) [16].

Toutefois, l'analyse des avantages et inconvénients de ces types de machines conditionnera le choix de l'utilisateur pour le domaine d'application envisagé, selon des critères bien définis. L'abondante recherche bibliographique effectuée dans ce sens [3-39] nous a permis d'établir des statistiques (Figure -I.1-) comparatives des machines électriques pour différents applications (Tableau I.1.). Ce qui va guider nos choix pour les applications EnR envisagées.

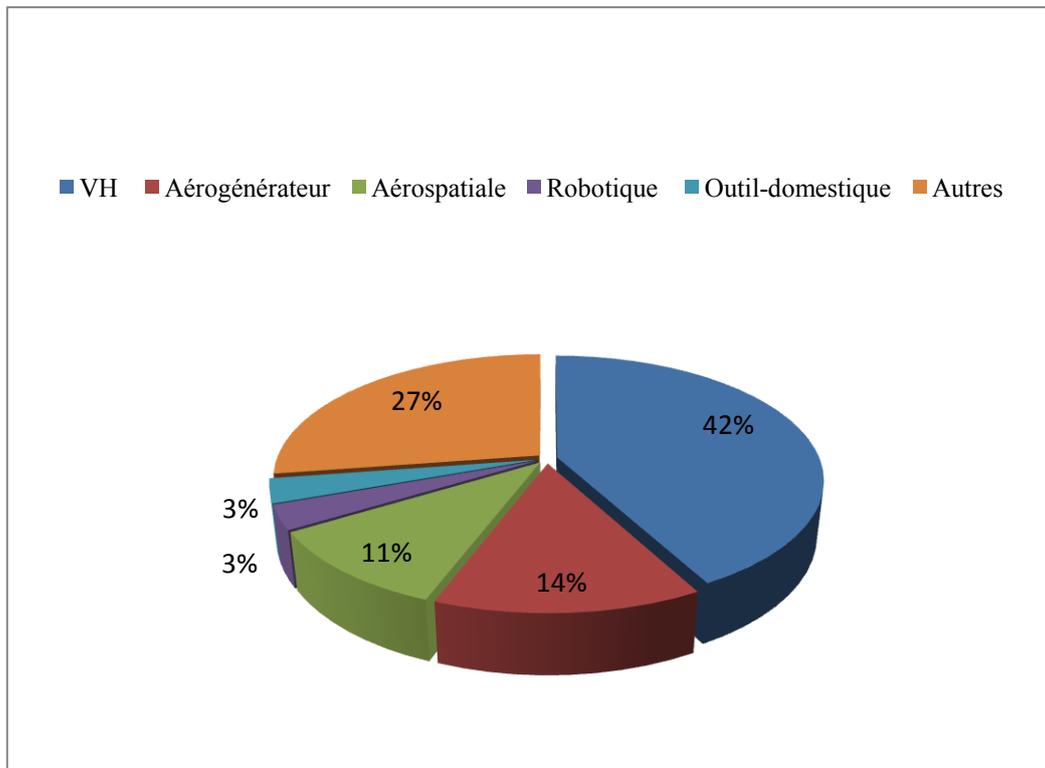


Figure -I.1- Fréquence d'utilisation des ME en fonction du domaine d'application.

Tableau I.1. Comparaison de machines électriques selon différentes applications

	IM	MSAP	MRV
VH	2	1	5
Aérogénérateur	5	4	3
Aérospatiale	2	4	3
Robotique	1	5	2
Outil-domestique	1	4	2
Autres	3	4	3
TOTAL	<i>14</i>	<i>22</i>	<i>18</i>

I.3 Etat de l'art

Au cours de ces dernières années, l'énergie éolienne a connu une croissance rapide en raison de son rôle dans la génération d'électricité mondiale. Dans [40 -45], l'histoire et la théorie de l'énergie éolienne avec les différentes chaînes classiques de conversion de cette technologie sont discutées. De plus, la capacité d'énergie éolienne mondiale connaît une croissance rapide et est devenue la filière d'énergie renouvelable à plus fort taux de croissance [23,46]. Divers concepts d'éoliennes ont été développés et différents générateurs ont été utilisés dans la recherche et la commercialisation afin d'utiliser plus efficacement cette énergie [23], [47,48].

Le choix du type d'aérogénérateur est souvent difficile à effectuer. En effet, le choix du générateur pour une éolienne dépend principalement de plusieurs critères: la structure, la topologie du convertisseur, l'environnement (endroit où la turbine est installée), les performances et le coût.

D'un point de vue industriel, les principaux types de générateurs adoptés pour les éoliennes sont : le générateur asynchrone à cage d'écureuil avec un multiplicateur de vitesses à plusieurs étages relié directement au réseau, le générateur asynchrone double alimentation, le générateur synchrone à aimant permanent et un générateur innovant qui est le générateur à réluctance variable, comme représentés Figure -I.2-.

Par ailleurs, d'après une lecture exhaustive de l'état de l'art des éoliennes, nous avons remarqué que les générateurs asynchrones à double alimentation étaient dominants, bien que

le générateur synchrone à aimant permanent soit utilisé de plus en plus dans le petit éolien, alors que les générateurs asynchrones à cage d'écureuil étaient en baisse et les générateurs à réluctance variable en hausse [23,46], [49,50].

Dans ce chapitre, les candidats potentiels dans l'énergie éolienne sont présentés et évalués selon les principales exigences d'un système éolien ; des conclusions sont ensuite tirées afin d'identifier le candidat le plus apte à être associé à une éolienne.

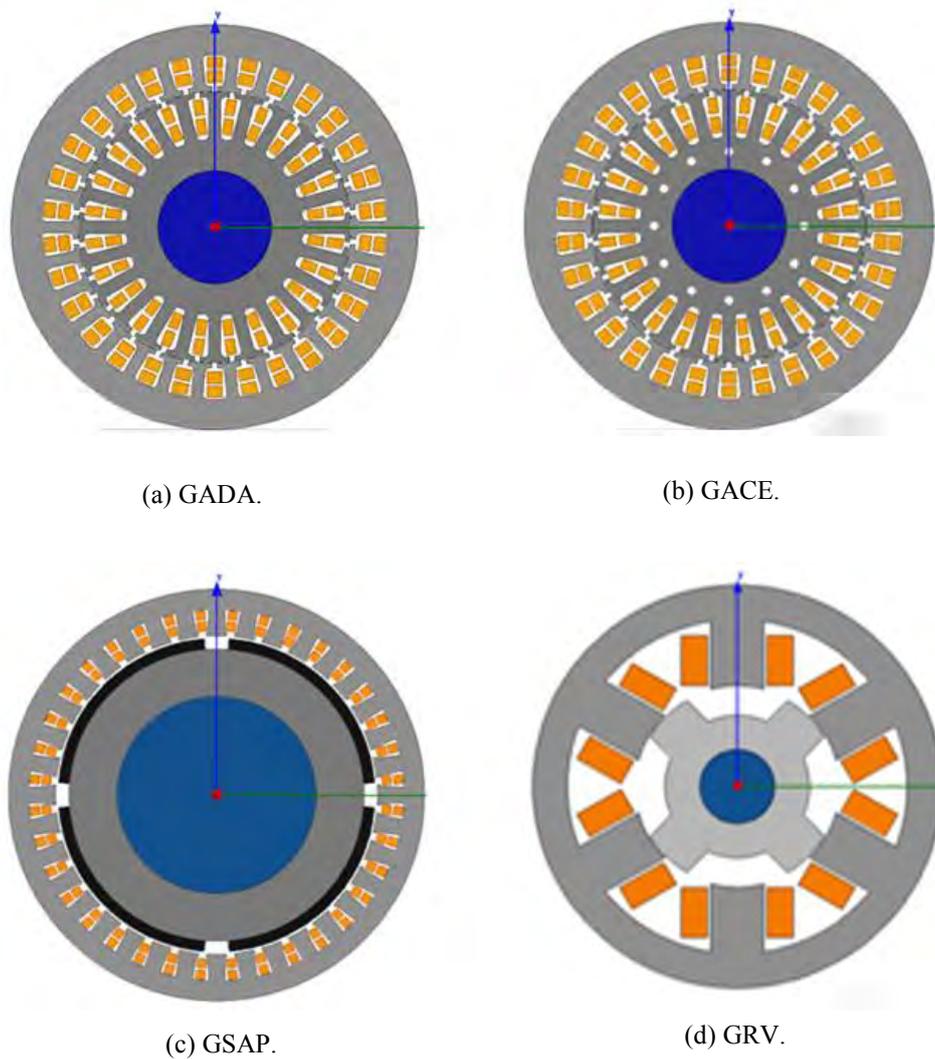


Figure -I.2- Candidats potentiels dans l'énergie éolienne.

I.4 L'énergie éolienne

I.4.1 Configuration de l'énergie éolienne

Les éoliennes modernes sont réparties en deux groupes essentiels : la conception à axe horizontal (AHWT) est représentée dans la Figure -I.3-a, comme les moulins à vent de fermes traditionnelles utilisées pour le pompage d'eau, et la conception à axe vertical (AVWT) est représentée dans la Figure -I.3-b, comme le eggbeater modèle Darrieus ou modèle Savonius. La majorité des grandes éoliennes modernes sont des turbines à axe horizontal. En fait, la différence entre eux est au niveau de l'arbre où le montage de l'arbre détermine l'orientation et la forme des pales de l'hélice, ce qui signifie que les éoliennes horizontales et verticales peuvent souvent varier en apparence. Les deux modèles ont leurs avantages et inconvénients [45]. Historiquement, les éoliennes à axe horizontal sont les plus largement utilisées ce qui signifie que leurs conceptions et technologies sont plus largement comprises et développées. Les éoliennes à axe vertical sont encore inconnues pour de nombreux utilisateurs de l'énergie éolienne.

L'étude comparative proposée ici s'est basée sur une structure d'éolienne à axe horizontal représentée dans la Figure -I.4-

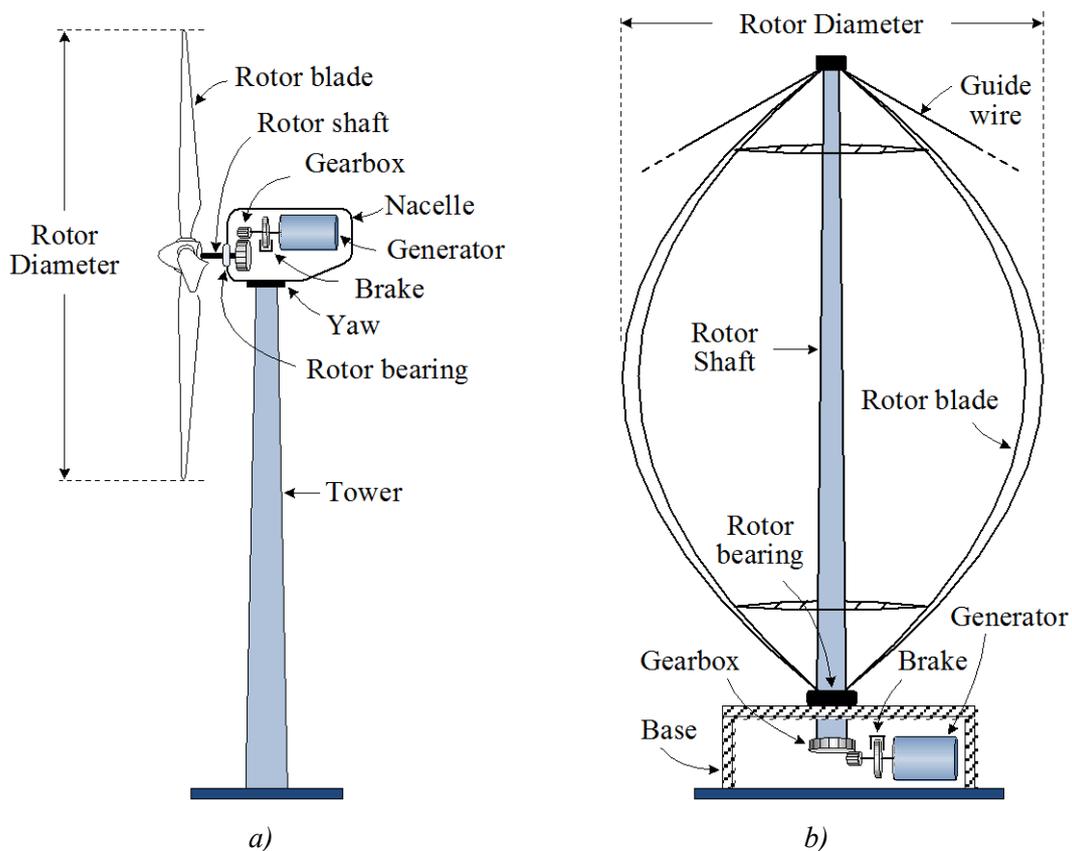


Figure -I.3- Conception d'éolienne à AHWT et AVWT. [51-52]

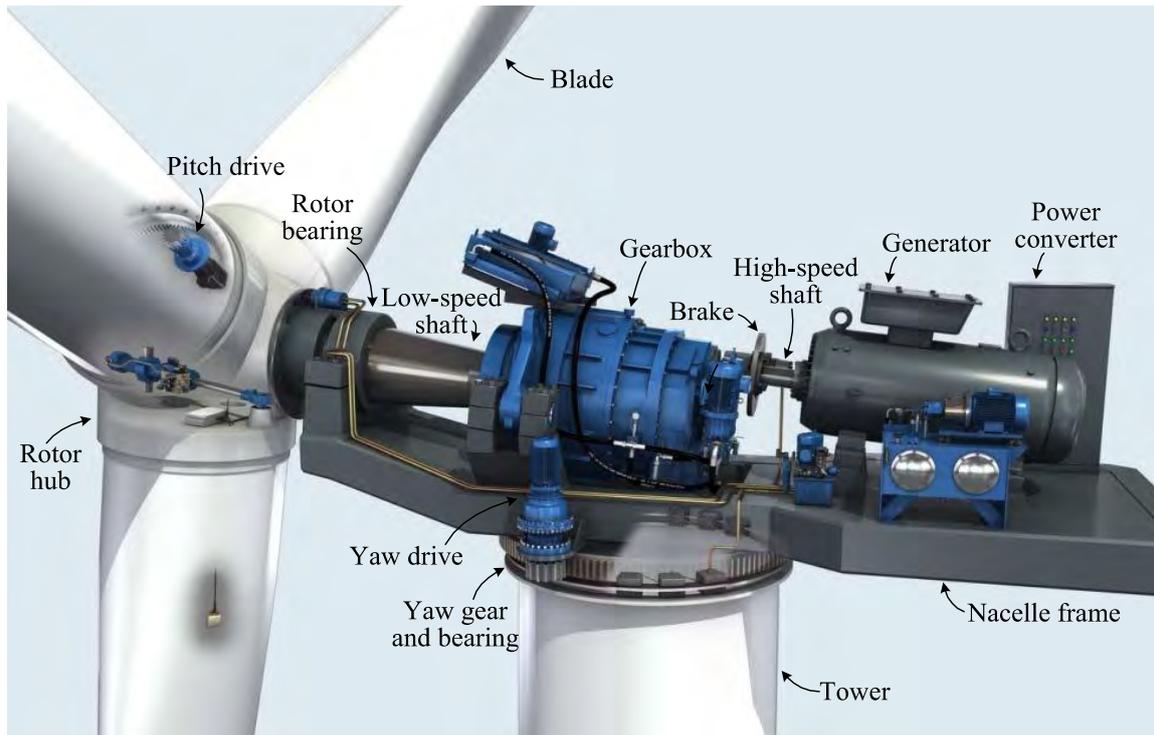


Figure -I.4- Sous-systèmes d'éolienne à AHWT. [51-52]

I.4.2 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

La première exigence du système est l'existence d'un flux de vent assez fort et sur une certaine durée ; un profil typique du vent a été calculé dans [48], [49] et est représenté dans la Figure -I.5- où la puissance aérodynamique est liée à la vitesse du vent v_w par l'équation (I.1)

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S v_w^3 C_p(\lambda) \quad (I.1)$$

Où:

ρ est la densité de l'air [kg / m^3]

$S = \pi R^2$ est la surface active de la pale de turbine [m^2]

v_w est la vitesse du vent [m / s]

$C_p(\lambda)$ représente le facteur de conversion aérodynamique pour l'éolienne (*Coefficient de performance*)

C_p varie avec λ le rapport de vitesse spécifique (*tip- speed ratio*) qui relie la vitesse du vent avec la vitesse du rotor comme donné par l'équation (I.2) et dont le graphe de turbines modernes est représenté dans la Figure -I.6-

$$\lambda = W \frac{R}{v_w} \quad (I.2)$$

Où:

$R [m]$ est le rayon de pale

$W [rad / s]$ est la vitesse de rotation du rotor

Finalement, le couple développé sur le rotor de la turbine est déterminé par l'équation (I.3) :

$$T = kv_w^2 \quad (I.3)$$

Dans une turbine à entraînement direct le générateur tourne à la même vitesse que la turbine, donc le même couple.

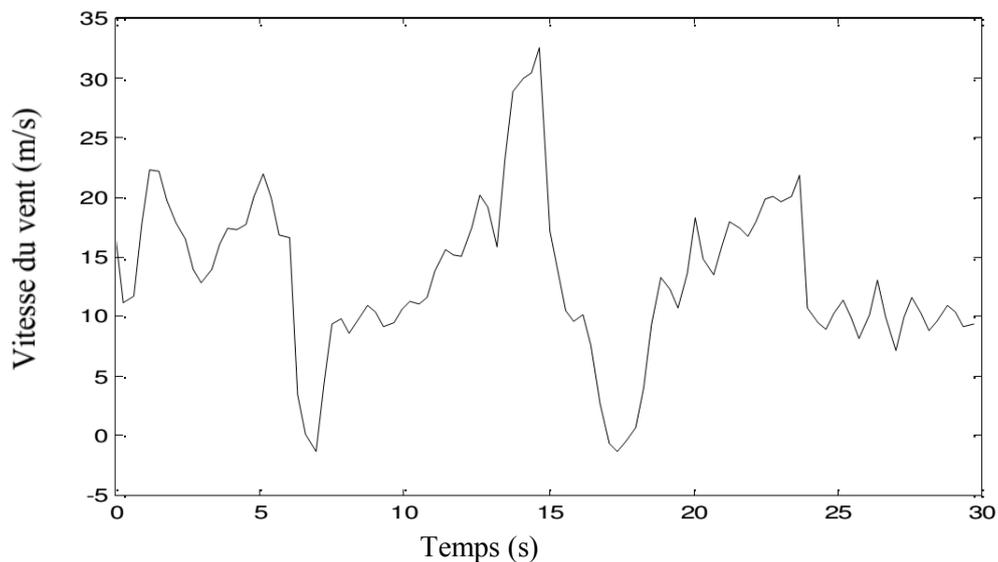


Figure -I.5- Profil typique du vent. [49]

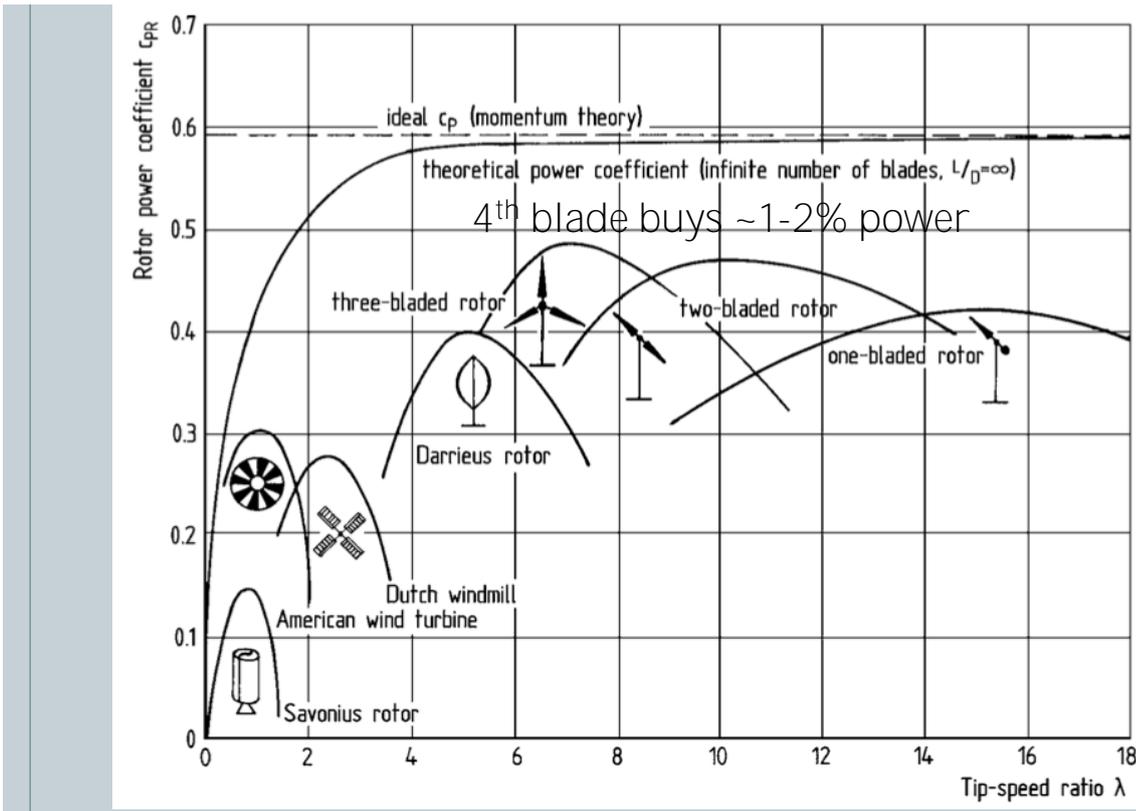


Figure -I.6- Coefficient de puissance C_p pour différentes éoliennes. [54]

Tip speed ratio
Speed at blade
divided by in
wind speed.

At low tip spe
ratio, losses f
wake.

A high tip spe
losses from a
drag.

I.4.3 Caractéristiques du générateur éolien

Les principales exigences des générateurs pour éoliennes, comme mentionné dans la littérature, sont résumées comme suit [23], [45-49] :

- Un couple et une densité de puissance élevés;
- Une réduction des éléments du système;
- Une haute efficacité;
- Moins d'entretien;
- Haute fiabilité et robustesse pour les diverses conditions d'exploitation du vent;
- Un coût raisonnable.

Par ailleurs, dans les environnements extrêmes, le générateur électrique devrait être tolérant aux pannes [54 -55]. Enfin, et d'un point de vue industriel, un critère de sélection supplémentaire est le degré d'acceptation de chaque type de générateur dans le marché qui est étroitement lié à la disponibilité et au coût de la technologie du convertisseur de puissance

associé. Dans [56], plusieurs combinaisons générateur-convertisseur sont comparées sur la base de la topologie, le coût, l'efficacité, la consommation d'énergie et la complexité de la commande.

La Figure -I.7- illustre l'un des principaux facteurs qui influent sur la performance d'une éolienne, à savoir sa réponse en puissance avec différentes vitesses du vent. Cela est généralement fourni par la courbe de puissance idéale de la turbine qui reflète les aérodynamismes, la transmission et l'efficacité de génération du système dans une forme intégrée. La caractéristique de performance en fonction de la vitesse du vent comprend quatre zones distinctes selon la Figure -I.7-:

- Zone I: où $P_t = 0$ la turbine ne produit pas de la puissance (l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort).
- Zone II: la vitesse de turbine est la vitesse du vent minimum v_w^{\min} à laquelle le système commence à produire de l'énergie ; v_w^{\min} varie d'une turbine à une autre, en fonction de ses caractéristiques de conception, et pour la plupart des éoliennes commercialisées v_w^{\min} est comprise entre 3 et 5 [m / s].
- Zone III: la turbine est limitée pour produire une puissance constante nominale P_r .
- Zone IV: la turbine est arrêtée pour des vitesses de vent dépassant v_w^{\max}

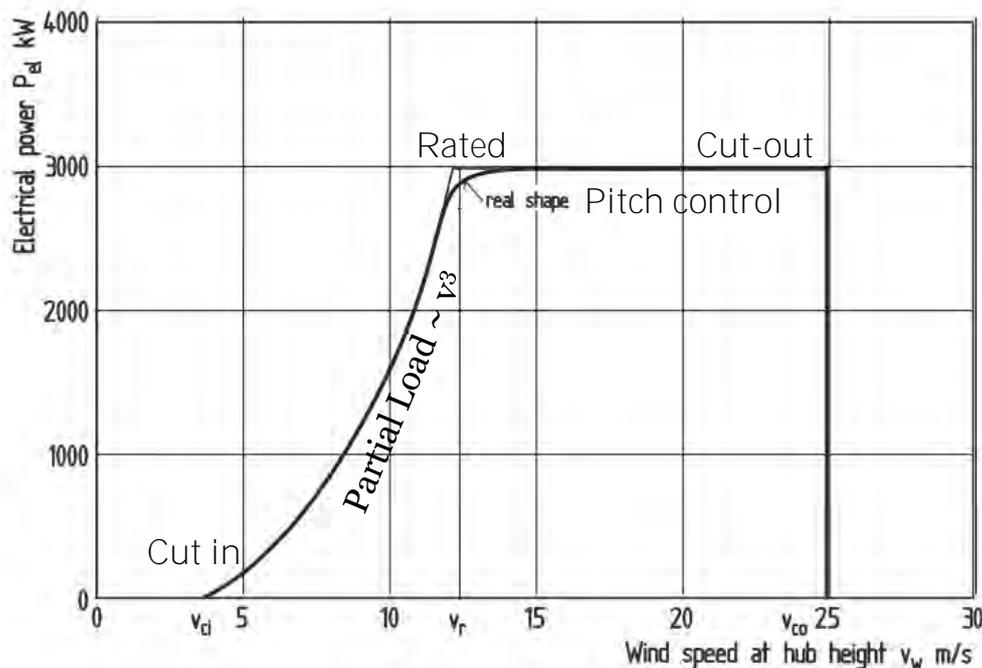


Figure -I.7- Courbe de puissance typique d'une éolienne. [53]

I.4.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne fait partie des énergies renouvelables. Elle a donc beaucoup d'avantages mais la technologie présente aussi quelques points faibles. Elle se développe de plus en plus ces dernières années dans le monde. Le Tableau I.2 résume quelques avantages et inconvénients.

Tableau I.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

 Avantages	 Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Non polluante (idéale pour lutter contre le réchauffement climatique et la pollution) • C'est une énergie renouvelable (inépuisable) • Rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés) • Complémentaire des filières traditionnelles. • Coûts décroissants 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent) • Bruit des pales (nuisances sonores) • Impact visuel (esthétique) • Interférences électromagnétiques • Danger pour les oiseaux (à cause des pales)

I.5 Etude comparative

Le générateur est un élément très important dans un système de conversion de l'énergie éolienne. Différents types de générateurs sont utilisés pour les éoliennes ; ils peuvent être soit asynchrones, soit synchrones. Récemment, sont apparus des générateurs innovants, susceptibles de travailler à des niveaux de puissance fluctuants.

I.5.1 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE)

La première énergie électrique produite avec une éolienne fut réalisée en 1887 par Charles Brush un scientifique de Cleveland en Ohio ; la puissance nominale utilisé était de 12kW et a été conçue pour recharger des batteries. La machine asynchrone est utilisée pour la première fois en 1951 [58]. Mais, dans les éoliennes qui utilisent un générateur asynchrone à

cage d'écurie comme représentée dans la Figure -I.8-, l'exploitation ne s'effectue qu'à vitesse constante. Ce type de générateur est en baisse pour ce type d'application car encombrant, à rendement faible et couplé via un multiplicateur de vitesses qui augmente la masse et le coût du système.

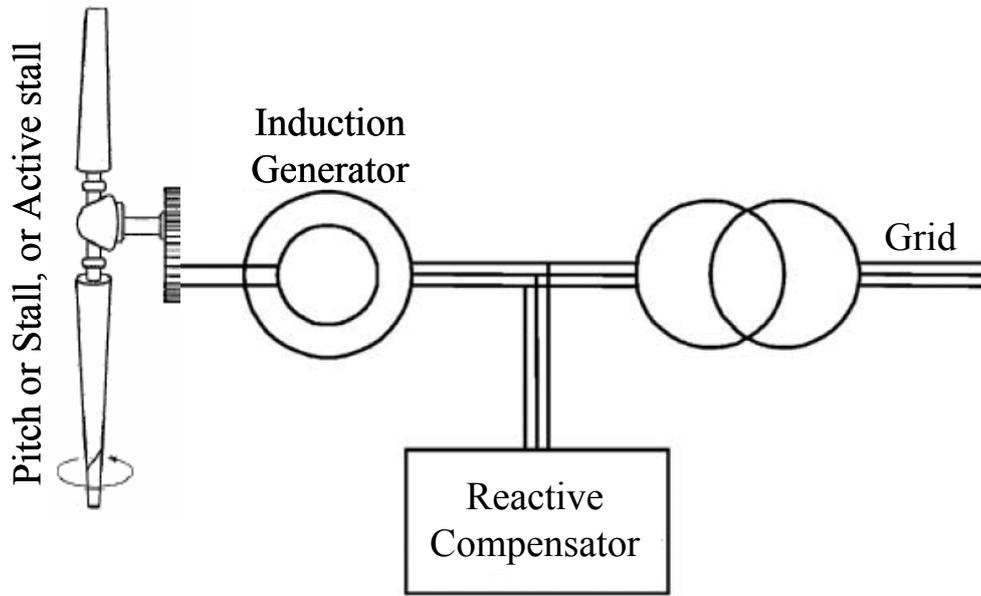


Figure -I.8- Schéma d'un système de production éolienne avec GACE. [48]

La figure -I.9- représente la courbe typique de couple-vitesse. La différence entre la vitesse de synchronisme N_s et la vitesse du rotor N_r est nommée glissement du moteur. Ainsi, le glissement (*Slip*) est donné par (I.4) :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (I.4)$$

La vitesse de synchronisme du moteur à induction est donnée par (I.5) :

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (I.5)$$

Où:

f est la fréquence

p est le nombre de pôles.

Quand on couple cette machine avec un réseau d'éolienne intégrée, initialement, il absorbe le courant à partir de réseau dans le cas d'un moteur. La vitesse augmente et la rotation de l'éolienne provoque le système à dépasser la vitesse de synchronisme N_s .

Ainsi, le rotor tournera plus vite que le champ magnétique tournant à N_s d'où inversion du couple qui devient négatif comme indiqué dans la Figure -I.9-. Le courant circulera en sens inverse depuis le système vers le réseau et la machine fonctionnera en générateur [57-59].

En outre, l'essor des circuits intégrés et semi-conducteurs de puissance a permis de travailler à vitesse variable donc à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes éoliens qui utilisent préférentiellement les machines asynchrones à double alimentation (MADA) et les machines synchrones (MS) au détriment des MACE dans l'application éolienne [23], [58-60]. À titre d'illustration, la Figure -I.10- montre une GACE industrielle pour éolienne [52-62].

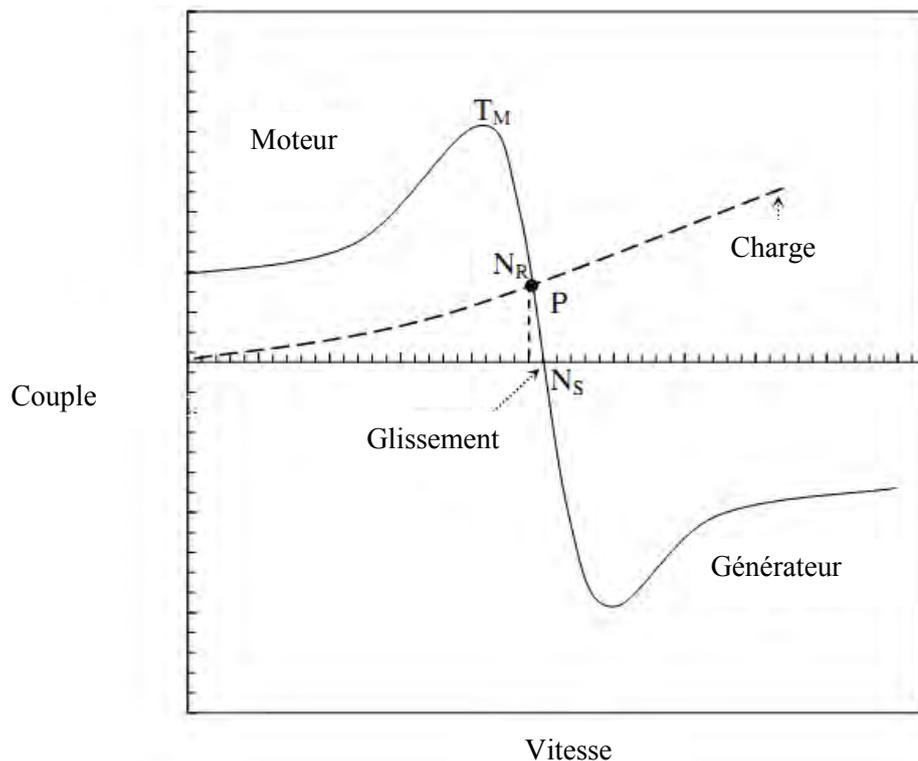


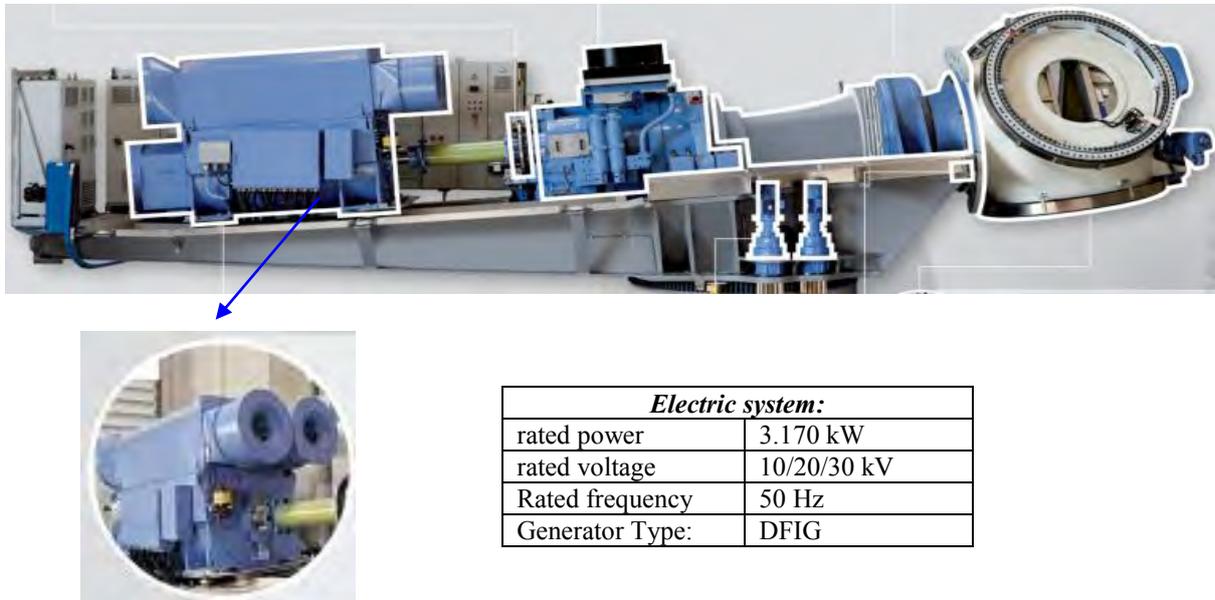
Figure -I.9- Caractéristiques d'une machine à induction typique. [57]



Figure -I.10- Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE) industriel pour éolienne.

I.5.2 Générateur asynchrone à double alimentation (GADA)

Aujourd'hui, plus de 70% des éoliennes sont construites avec un générateur asynchrone à double alimentation [59]. Beaucoup de fabricants, tels que Vestas, Gamesa, GE et REpower ont fourni le système d'éolienne avec ce concept comme représenté dans la Figure I.11 [24]. En fait, la GADA a connu un grand progrès si on la compare avec la GACE [47], [63].



<i>Electric system:</i>	
rated power	3.170 kW
rated voltage	10/20/30 kV
Rated frequency	50 Hz
Generator Type:	DFIG

Figure -I.11- GADA industriel pour éolienne du fabricant REpower. [64]

Le système représenté dans la Figure -I.12- est constitué d'une éolienne avec GADA où le stator est relié directement au réseau tandis que le bobinage rotorique est relié via un système bagues-balais au convertisseur statique. Comme indiqué dans la Figure -I.13- la GADA peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur avec une plage de vitesses de rotor $\pm \Delta w_r^{\max}$ de l'ordre de la vitesse de synchronisme w_1 . Le modèle dynamique et le système de commande de la GADA sont examinés dans [66 -68].

De plus, de nouveaux types de générateurs qui peuvent changer la configuration de l'énergie éolienne sont en cours de développement où la nouvelle conception élimine la plupart des organes mécaniques, comme le système bagues-balais et la boîte de vitesses (gearbox) qui sont considérés comme des inconvénients à ce concept. L'objectif recherché est la réduction de la masse et du coût du système, une haute fiabilité et disponibilité. Dans cette perspective, il faut remarquer que la plupart des travaux de recherche ont tendance à utiliser les GADAs dans l'application éolienne car ils ont d'excellentes performances [63 -68]. Le fonctionnement à vitesse variable de la GADA offre de nombreux avantages pour réduire les coûts et a le potentiel pour être construite économiquement au-dessus des niveaux de puissance de 1,5 MW pour les applications off-shore [69].

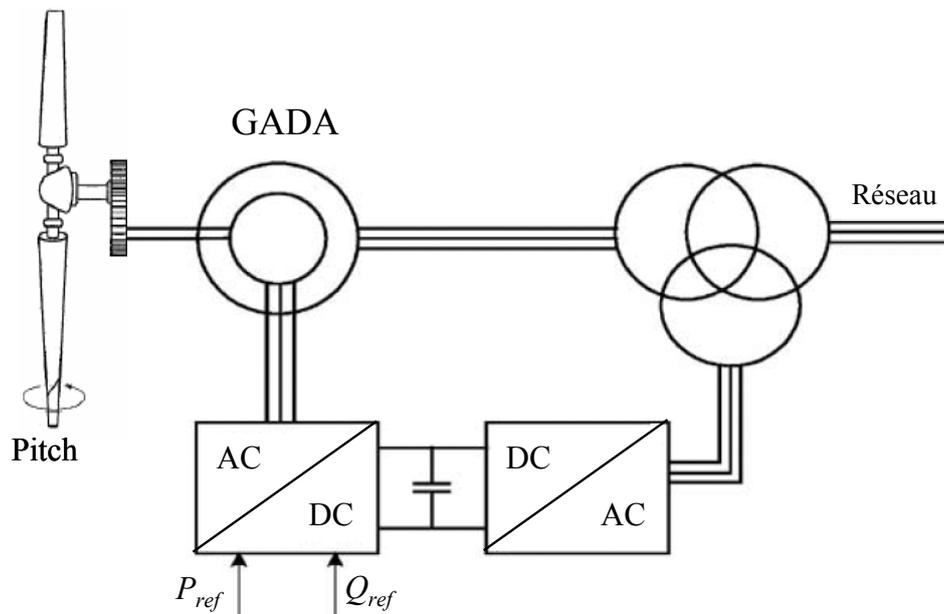


Figure -I.12- Schéma d'un système de production éolienne avec GADA. [48]

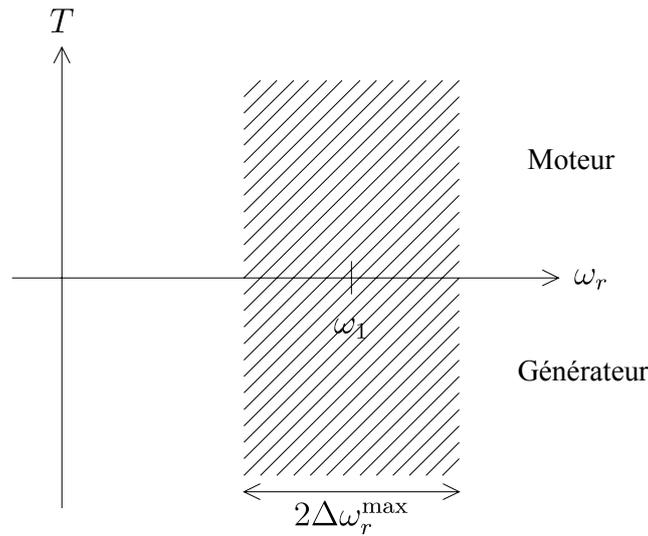


Figure -I.13- Caractéristiques d'une GADA couple-vitesse. [65]

I.5.3 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP)

Un Générateur Synchrone à Aimant Permanent (GSAP) se compose d'un rotor et d'un stator triphasé comme un générateur asynchrone représenté figure -I.2- (c). Ces générateurs sont les plus aptes à rivaliser avec les générateurs asynchrones pour les applications éoliennes. En fait, ils sont adaptés pour les petites éoliennes (Figure -I.14-) et ont un certain nombre d'avantages, à savoir:

- (a) simple et configuration plus efficace dans le rotor avec l'aimant permanent (auto-excitation)
- (b) densité de puissance élevée
- (c) rendement élevé
- (d) chaleur dissipée de manière efficace

Dans la MSAP, on peut augmenter la densité de flux d'entrefer si on augmente l'épaisseur des aimants, ce qui est approximée par l'équation (I.6) [70]

$$B_m = B_r \frac{k_{leak}}{1 + \frac{\mu_r * g * k_{carter}}{h_m}} \quad (I.6)$$

Où:

h_m : épaisseur de l'aimant,

B_r : induction rémanente d'aimant, 1.23 [T] pour NdFe35,

g : entrefer,

μ_r : perméabilité rémanente d'aimant, 1.09981 pour NdFe35,

k_{leak} : coefficient de fuites, typiquement dans la plage de 0,9 à 1,0 pour les MASP à aimant surfacique.

k_{carter} : coefficient de Carter, typiquement dans la plage de 1,0 à 1,1 pour les MASP à aimant surfacique.

Bien que la machine puisse atteindre une densité de flux d'entrefer plus grande avec un diamètre d'alésage de stator plus petit, l'avantage de cette conception de la machine à AP est qu'elle ait un rendement plus élevé (97%) que la machine asynchrone (85%).

Vu leurs excellentes performances (rendement, efficacité et fiabilité), la tendance générale dans l'industrie éolienne est d'opter pour des puissances plus élevées, ce qui est particulièrement pertinent en environnement difficile où plusieurs entreprises ont été tentées par cette conception:

Jeumont (0.75 MW), Vensys (1.5 MW), Leitner (1.5 MW), Harakosan (2 MW), Mitsubishi (2 MW), Siemens (3.6 MW), et TheSwitch (4.25 MW) [70]. Dans [74], un aperçu des éoliennes commercialisées avec des machines synchrones de plus de 1 MW.

À titre d'illustration, la Figure -I.14- montre une MSAP industrielle de 1650-6300 kW, et de vitesse 11 à 17 tours par minute de la compagnie **TheSwitch** [72].



Figure -I.14- Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) industriel (TheSwitch).

Plusieurs auteurs examinent les bénéfices et les limites physiques et économiques des MSAP et considèrent leur pertinence comme un élément clé dans la conception du système éolien global [71 -76] où les résultats rapportés sont prometteurs.

D'après l'analyse des générateurs d'éoliennes disponibles dans le commerce, l'élimination du multiplicateur de vitesse (gearbox) augmentera de manière significative la fiabilité du système et le rendement global du système va augmenter parce que les pertes et les pannes dans le multiplicateur de vitesse sont diminués ou éliminés. La tendance actuelle et future se dirige vers l'entraînement direct (direct-drive) dans la production d'énergie éolienne. Néanmoins, l'exigence des matériaux à aimants permanents limite les applications des MSAP, soit à cause du coût (élevé) ou du risque de démagnétisation.

I.5.4 Générateur à reluctance variable (GRV)

Le générateur à réluctance variable est considéré comme innovant dans le domaine éolien vu ses multiples atouts (robustesse, simplicité de construction, rotor non bobiné ou aimanté, tolérance aux pannes, performances et coût). La structure d'une GRV 6/4 est représentée dans la Figure -I.2- (d). Sa caractéristique couple-vitesse représentée dans la Figure -I.15- indique qu'elle peut fonctionner d'une façon inhérente avec une gamme de puissance constante et extrêmement longue. Cependant, il existe certains inconvénients tels que le bruit acoustique induit par la saillance des pôles, l'ondulation du couple, la topologie du convertisseur, Malgré ces inconvénients, la GRV est une solution qui est déjà envisagée pour des applications éoliennes (Figure -I.16-) [49].

Jebaseeli [50] a mis en exergue les performances de la GRV pour cette application particulière. Il a présenté une simulation de la GRV avec trois bobinages différents dans une éolienne à vitesse variable et a conclu que les systèmes éoliens avec GRV offraient une meilleure efficacité et un coût réduit par rapport aux générateurs classiques.

H. Chen a montré que le système de production éolienne peut être contrôlé facilement et mis en œuvre avec une GRV qui a la simplicité de la commande. En outre, la GRV peut offrir un rendement élevé sur une plage de vitesse très large avec une structure rotorique compatible avec des vitesses élevées et tolérante dans les environnements extrêmes [55], [77].

Certaines applications naissantes et sous-marines de la GRV sont données dans [78].

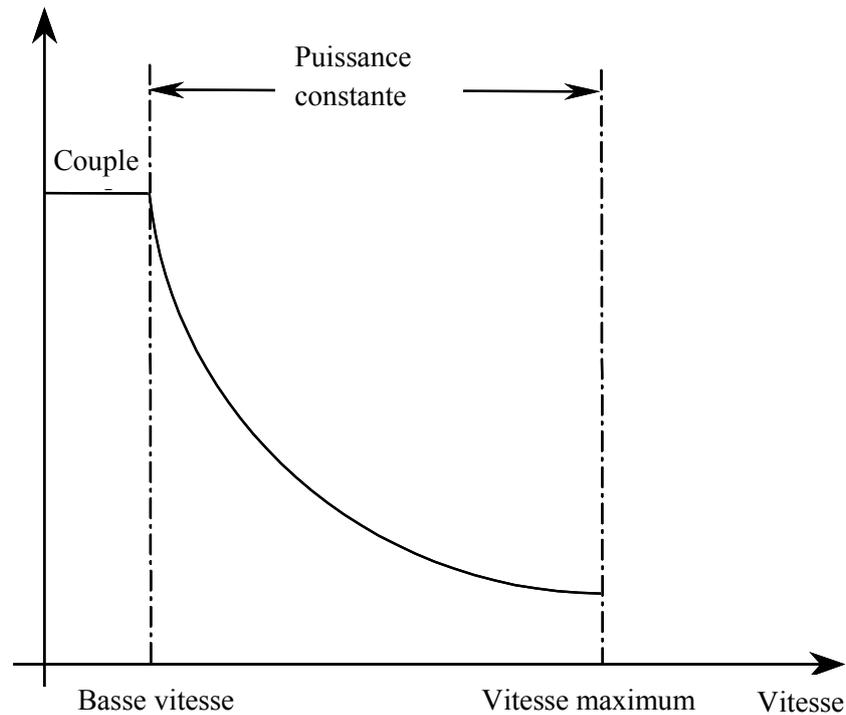


Figure -I.15- Caractéristique typique couple-vitesse d'un moteur à réluctance variable.



Figure -I.16- Stator et rotor d'une machine à réluctance variable de 20 kW

I.5.5 Applications industrielles

Le Tableau I.3. résume brièvement les grands fabricants commercialisant dans l'industrie de l'énergie éolienne. D'autres exemples relatifs aux générateurs pour des applications d'éoliennes sont donnés dans [23], [50], [72], [79 -89].

Tableau I.3. Les principaux fabricants d'éoliennes.

	Nom de l'entreprise	MW	système de génération
	Vestas Denmark	3	GSAP
	Sinovel China	3	GADA
	Gold wind China	2.5	GSAP
	Gamesa Spain	2	GADA
	Enercon Germany	2	GSAP
	GE energy United States	3.6	GADA
	Suzlon India	2.1	GADA
	Siemens Germany	3.3	GSAP
	Ming yang wind power/China	2.5-3	GSAP
	Theswitch China	3.8	GSAP

I.5.6 Conclusion préliminaire et perspectives

Apparemment, le générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) semble être le candidat le plus adapté pour les systèmes d'énergie éolienne. En fait, cette solution est consensuelle comme illustré par l'évaluation résumée dans le Tableau I.4. et effectuée sur la base des caractéristiques principales des systèmes d'énergie éolienne, chacun d'eux étant noté

de 1 à 5 points, où le meilleur est noté par 5 points. Dans notre étude comparative nous avons implicitement donné le même poids à toutes les caractéristiques; autrement, certaines de ces caractéristiques doivent être pondérées en fonction de l'application.

Par exemple, dans [90], le choix du générateur est déterminé par quatre critères: la fiabilité et la facilité d'entretien; poids total de la nacelle; rendement énergétique et les problèmes d'intégration au réseau et le coût. Un autre exemple, quand la nacelle est mise dans un environnement dur et variable où la fiabilité et la maturité technologique sont beaucoup plus importantes que le rendement, ceci pourrait mener à une autre classification.

Cependant, parmi les caractéristiques des éoliennes mentionnées, la densité de couple et le rendement énergétique sont les deux caractéristiques fondamentales qui sont influencés par la dynamique de la turbine et de l'architecture du système. Par conséquent, le choix du système de production d'électricité (générateur électrique) pour l'éolienne exige une attention particulière à ces deux caractéristiques.

A partir de cette analyse, une conclusion s'impose : les générateurs synchrones à aimant permanent sont une alternative intéressante (Tableau I.4.). Ceci justifie la raison pour laquelle la concurrence reste difficile entre GADA et GSAP. Dans ce contexte, certains fabricants essaient de combiner les avantages de ces deux machines.

Récemment, un générateur innovant à réluctance variable a gagné beaucoup d'intérêt et est reconnu pour avoir un potentiel aux applications d'énergie éolienne [91 -93]. D'autres chercheurs optimisent leur contrôle et leurs caractéristiques dans ce domaine, puisque ce générateur développé peut produire d'excellentes performances sans l'utilisation d'aimants permanents (coût) ou de cuivre (pertes) dans le rotor, ce qui se traduit par un coût de fabrication réduit et une capacité de fonctionnement à des températures et des vitesses plus élevées.

Tableau I.4. Évaluation des systèmes éoliens.

<i>Systemes</i>				
<i>Caractéristiques</i>	GADA	GACE	GSAP	GRV
Densité de puissance	4.5	3.5	5	3.5
Efficacité	4	3.5	5	3.5
Contrôlabilité	5	4	5	4
Fiabilité	4	3	4	5
Maturité technologique	5	5	4	4
Poids	3.5	3.5	5	2
Coût	4	4	3	5
Σ Total	 30	 26.5	 31	 26

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les générateurs candidats potentiels pour des applications éoliennes ont été présentés et évalués selon les exigences principales du système considéré. L'étude comparative a montré que le générateur synchrone à aimant permanent est une solution consensuelle très attrayante, même si la concurrence reste difficile avec le générateur asynchrone à double alimentation. Par ailleurs, dans ce chapitre, on a mentionné un générateur innovant type à réluctance variable qui gagne beaucoup d'intérêt pour des applications éoliennes dans un futur proche.

Etude et Conception d'une Machine Synchrone à
Aimants Permanent à Basse Vitesse (MSAPBV)
associée à une Éolienne de 1.5 MW

CHAPITRE II

Etude et Conception d'une Machine Synchrone à Aimants Permanent à Basse

Vitesse (MSAPBV) associée à une Éolienne de 1.5 MW

II.1 Introduction	25
II.2 Spécifications de la turbine éolienne entraînant l'aérogénérateur	25
II.3 Différentes topologies de MSAP	27
II.3.1 Rotor avec aimants en Surface	28
II.3.2 Rotor avec aimants Insérés	29
II.3.3 Rotor avec aimants Enterrés	29
II.3.4 Rotor avec aimants à Concentration de Flux	29
II.3.5 Les Aimants Permanents	30
II.4 Caractéristiques principales de la MSAP étudiée	31
II.5 Dimensionnement analytique de la MSAPBV	34
II.5.1 Modèle analytique & équation de dimensionnement	34
II.5.2 Calcul des volumes et masses des différentes parties de la MSAPBV	38
II.5.2.1 Volume et masse du stator	38
II.5.2.2 Volume et masse du rotor	40
II.5.2.3 Masse totale de la MSAPBV	40
II.5.3 Analyse des résultats Analytiques	41
II.6 Simulation numérique par éléments finis	45
II.6.1 Méthodes numériques	45
II.6.2 Principe de la méthode des éléments finis	46
II.6.3 Equations électromagnétiques	47
II.6.4 Modèle de la MSAPBV étudiée	49
II.6.5 Analyse des résultats numériques	51
II.7 Conclusion	52

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre est consacré au dimensionnement d'une Machine Synchrones à Aimants Permanent à Basse Vitesse (MSAPBV), donc à grand nombre de pôles et à grand diamètre, à associer à une turbine éolienne de puissance élevée par entraînement direct (*direct-drive*), sans boîte de vitesses. Après une brève description du système éolien étudié, nous présenterons les différentes topologies de machines synchrones fréquemment utilisées comme aérogénérateurs avant de fixer notre choix sur une structure donnée.

Il s'agira ici d'une machine synchrone à aimants permanent à basse vitesse que nous allons dimensionner analytiquement, moyennant un cahier des charges spécifiant notamment les puissance (1.5 MW) et vitesse (1.55 rad/s). Après avoir calculé les dimensions principales de la MSAPBV à partir d'un modèle analytique, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice à partir d'une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis. Les différentes simulations ont été effectuées grâce à un code de calcul que nous avons réalisé sous MATLAB couplé au logiciel éléments finis FEMM. Les résultats obtenus ont été analysés et discutés.

II.2 Spécifications de la turbine éolienne entraînant l'aérogénérateur

Moyennant l'étude exposée dans le premier chapitre, traitant des différentes configurations d'éoliennes, des équations de conversion d'énergie ainsi que des principales caractéristiques associées, nous avons opté pour une turbine éolienne tripale à axe horizontale à entraînement direct (*EHED*) comme représentée dans la Figure -II.1-. Il s'agit d'une turbine WP 1.5-MW du constructeur NREL dont les caractéristiques sont données dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Éolienne WP 1.5-MW de NREL [52]

Nombres de pales	3	-
Diamètre du rotor	70	m
Hauteur	84.3	m
Puissance	1.5	Mw
Inertie de la turbine	4.4532e5	kg.m ²
Vitesse du vent	12	m / sec

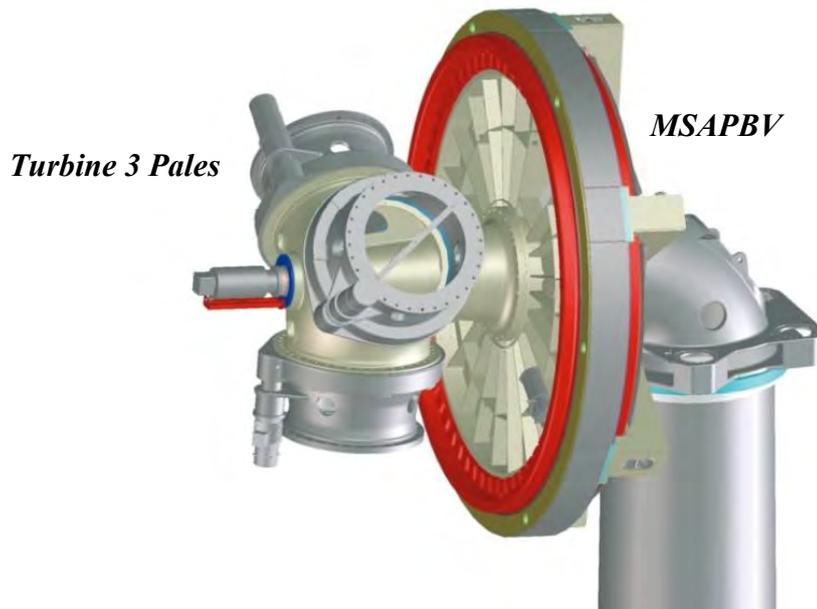


Figure -II.1- Éolienne à axe horizontal à entraînement direct (EHED). [94]

Le Tableau II.2 présente une comparaison rapide entre les deux technologies d'entraînement existantes, avec boîte à vitesses (*gearbox*) et sans (*direct-drive*).

Tableau II.2. Comparaison des systèmes éoliens avec multiplicateur (Gearbox) et entraînement direct (Direct-Drive).

Gearbox	Direct-Drive
✓ 89 % du marché est pris par le système avec multiplicateur.	✓ 11 % du marché est pris par le système de transmission directe.
✓ Génératrice à grande vitesse et petites dimensions.	✓ Génératrice à basse vitesse et grandes dimensions.
✓ Plus de maintenance.	✓ Simplicité du système.
✓ Coût est important.	✓ Bénéfice dans coût et poids.
✓ Une meilleure efficacité lorsque les vents sont forts.	✓ Une meilleure efficacité lorsque les vents sont faibles.

II.3 Différentes topologies de GSAP classiques

Selon la littérature [34-40], et avec l'avènement des matériaux magnétiques (notamment les aimants permanents) et les développements réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les dispositifs à aimant permanent ont connu ces dernières années une grande croissance. Pour répondre à de nouvelles exigences en matière de performances, les machines synchrones à aimant permanent ont rapidement trouvé des applications dans les véhicules électriques et hybrides, l'aérospatiale, la robotique, les équipements médicaux ainsi que la production d'énergie renouvelable qui nous intéresse particulièrement ici. Pour toutes ces différentes applications, les MSAP sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles telles que les machines à courant continu, les machines synchrones ou asynchrones, en particulier pour des applications spécifiques (servomoteur, vitesse variable, aérogénérateurs, ...).

Concernant le principe de fonctionnement des MSAP, est basé sur la théorie du champ magnétique tournant en synchronisme avec le rotor (selon la loi liant la vitesse de rotation en relation à la fréquence d'alimentation du bobinage statorique et au nombre de paires de pôles : $n=f/p$) d'où l'appellation de *machine synchrone*. Les aimants d'excitation sont situés sur la partie tournante (rotor) alors que la partie fixe (stator) est munie d'un enroulement triphasé à distribution spatiale sinusoïdale.

A titre indicatif, nous citerons quelques avantages des machines à aimants permanents :

- ✚ Absence de pertes joules au niveau du rotor.
- ✚ Couple volumique et puissance massique élevés.
- ✚ Construction simple et moins de frais d'entretien (absence de collecteurs et balais).
- ✚ Densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assurant une très bonne performance dynamique et un très bon rendement.
- ✚ En fonctionnement générateur, la machine à AP ne nécessite aucune alimentation électrique.

Nous pouvons classer les machines à aimant permanent en trois catégories, selon le principe de fonctionnement :

- ✚ les machines à aimant permanent à courant continu (MCC)
- ✚ les machines à aimant permanent sans balais (MAPSB) ou *Brushless*
- ✚ les machines synchrones à aimant permanent (MSAP)

Par ailleurs, nous pouvons classer les MSAP selon le placement des aimants permanents (AP) comme indiqué dans la Figure -II.2- Parmi les structures les plus connues [34 -40], on distingue le cas où les aimants permanents sont en surface (*Figure -II.2-a*), enterrés (*Figure -II.2-b*), insérés (*Figure -II.2-c*) ou à concentration de flux (*Figure -II.2-d*).

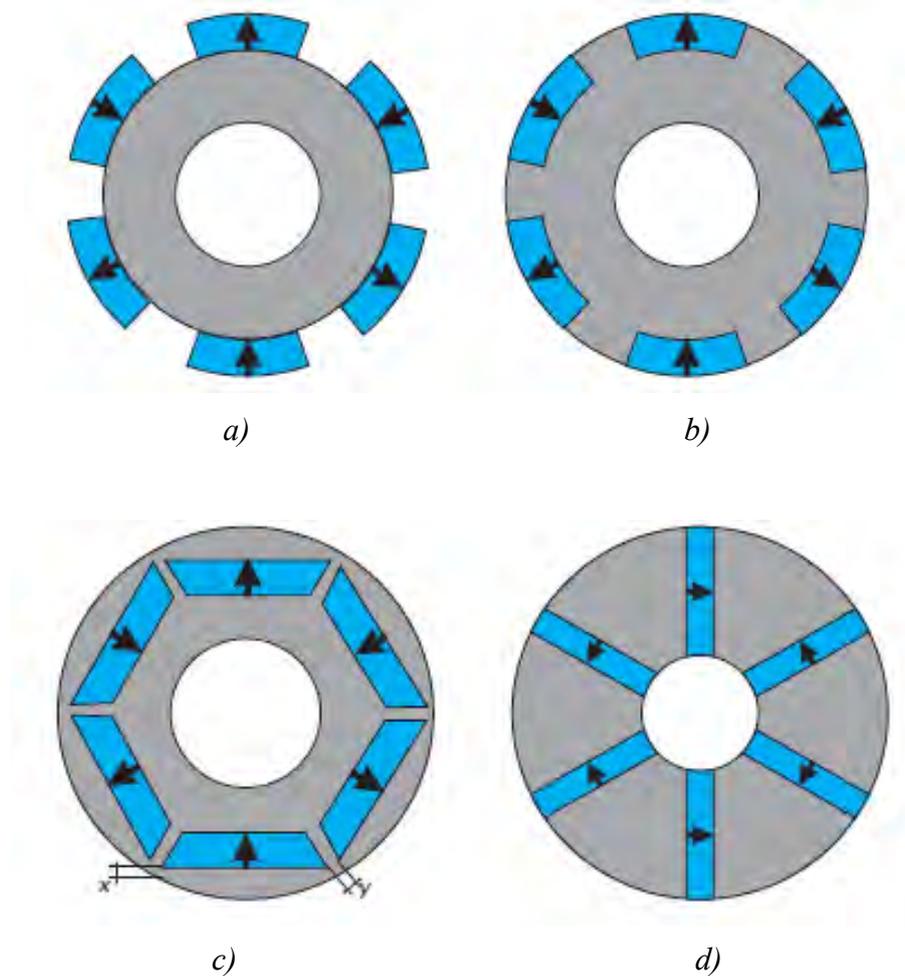


Figure -II.2- Différentes structures rotoriques pour une MSAP classique. [35]

II.3.1 Rotor avec aimants en surface

Pour ce type de positionnement des AP, comme schématisé dans la *Figure -II.2-a*, cette configuration du rotor est la plus utilisée. Les aimants sont placés sur la surface du rotor et

sont aimantés radialement. Le principal avantage de cette machine est sa simplicité donc faible coût par rapport à d'autres machines à aimant. Mais son inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisants. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur décolllement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé pour protéger les aimants permanents de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone (les axes d et q sont pratiquement les mêmes).

II.3.2 Rotor avec aimants insérés

Pour ce type de positionnement, comme indiqué dans la *Figure -II.2-b*, les aimants sont insérés à la surface du rotor avec un remplissage des ouvertures entre les aimants par du fer. Ceci va créer une saillance et donner un couple réductant en plus du couple synchrone. La réactance synchrone de l'axe-q est légèrement supérieure à celle selon l'axe-d.

II.3.3 Rotor avec aimants enterrés

Pour ce type de configuration, comme schématisé dans la *Figure -II.2-c*, les aimants sont enterrés dans le rotor et sont aimantés radialement ; ils sont ainsi très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

II.3.4 Rotor avec aimants à concentration de flux

La quatrième façon de placer les aimants dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor avec une aimantation azimutale dans le sens de la circonférence comme indiqué la *Figure -II.2-d* où les pôles magnétiques se forment au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux généré par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants enterrés, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques.

II.3.5 Les aimants permanents

Pour ce type des machines, les aimants sont les éléments principaux pour la construction de ces machines. Ils ont une influence non négligeable sur leur couple massique, leurs performances et leur coût. Par rapport aux matériaux doux (tels que les ferromagnétiques), les matériaux durs ou AP sont caractérisés par leurs cycles d'hystérésis, notamment par la courbe de désaimantation comme représenté dans la Figure -II.3- [34-40].

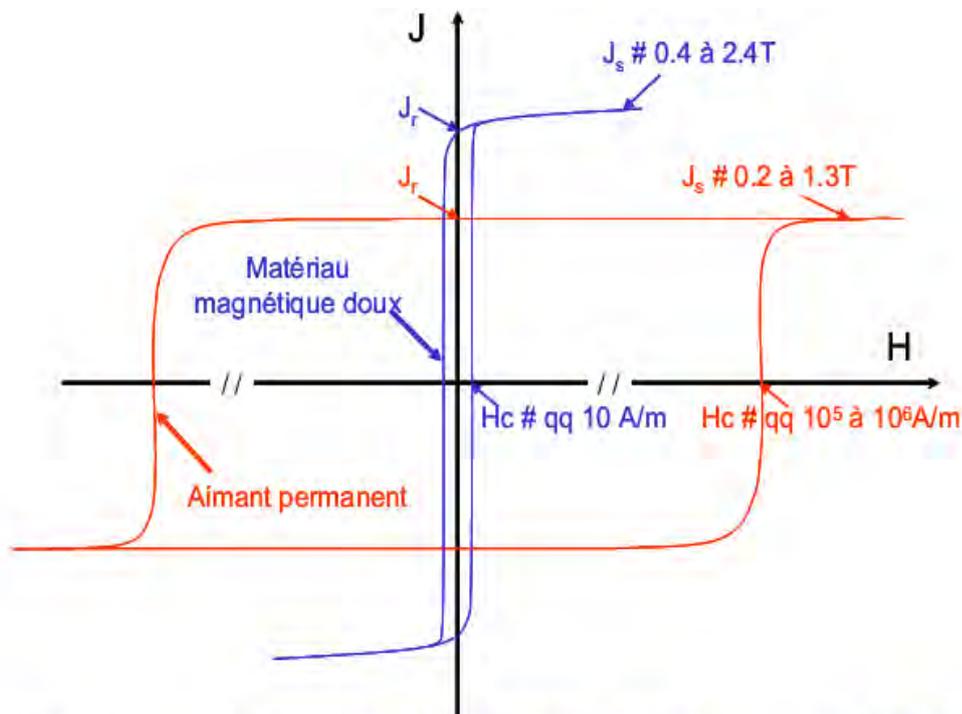


Figure -II.3- Courbe de désaimantation.

Les différentes technologies d'aimants sont :

- Alnico ou Ticonal (1930-1940): en voie de disparition des applications énergie
- Céramiques (1950) : différentes nuances de ferrites, intérêt du faible coût.
- Terres rares (1960-1980):
 - SmCo (Samarium-Cobalt) : différentes nuances, liants plastiques
 - NdFeB (Néodyme-Fer-Bore): c'est la technologie la plus évolutive.

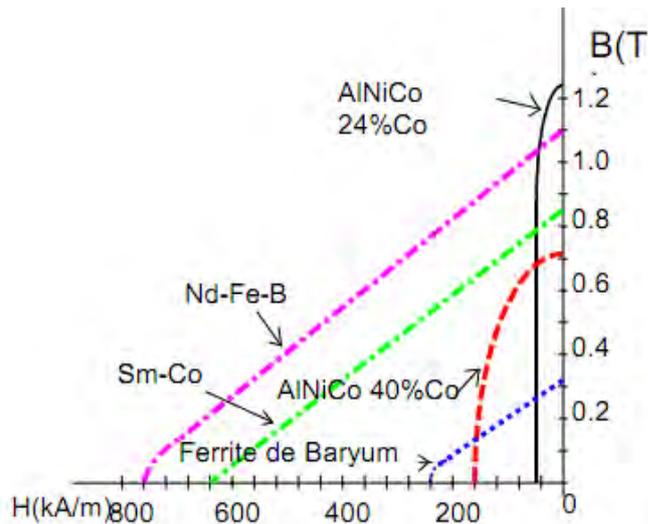


Figure -II.4- Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

II.4 Caractéristiques principales de la MSAP étudiée

Les caractéristiques principales de la MSAP étudiée sont déterminées à partir d'une puissance et vitesse données où la valeur de la vitesse du rotor par rapport à la puissance est déterminée à partir d'une turbine éolienne de grande puissance existante [95, 96]. D'après une vitesse de vent du système spécifiée dans le Tableau II.1. et égale à 12 m/s, la vitesse du rotor, sans rapport de boîte de vitesses, correspondante est de 14,8 rpm selon la Figure -II.5- d'une éolienne de 2 MW [95, 96].

Ceci étant, nous allons à présent effectuer un pré-dimensionnement de l'aérogénérateur entraîné par la turbine, moyennant un cahier des charges et avec une approche analytico-numérique synthétisée dans la Figure -II.6-. Il s'agit d'une machine synchrone à aimant permanent basse vitesse et de forte puissance à entraînement direct dont les caractéristiques principales sont résumées dans le Tableau II.3. Les dimensions principales de la génératrice seront déterminées à partir de l'équation de dimensionnement (II.8) [91].

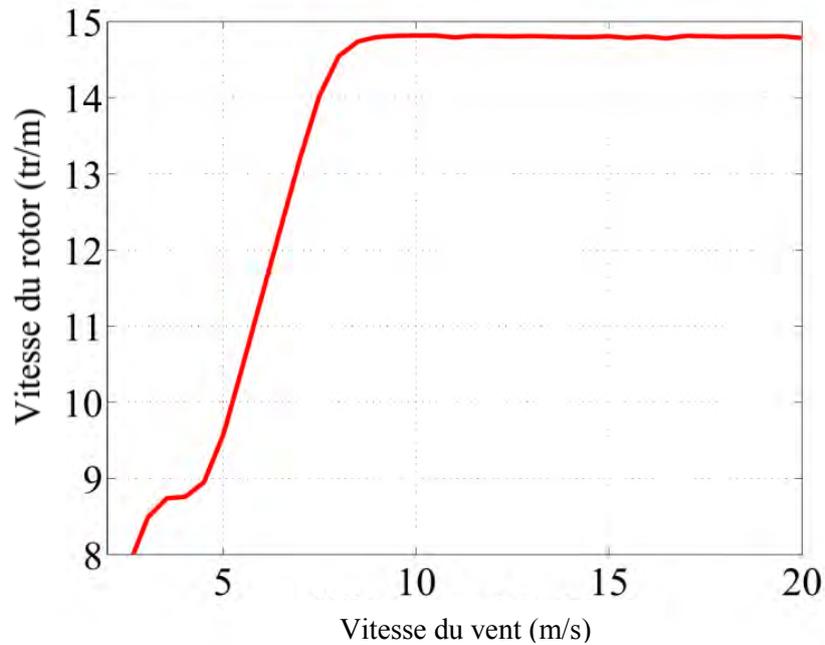


Figure -II.5- Vitesse du rotor versus la vitesse du vent pour une éolienne de 2 MW.

Tableau II.3. Paramètres de conception associés à la MSAPBV

<i>Paramètres de conception</i>	<i>Notations</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Puissance nominale	P_1	1.5	MW
Vitesse de rotation	Ω	1.55	rad/s
Nombre de phases	m_i	3	-
Fréquence	f	50	Hz
Facteur de puissance.	$\cos \varphi_1$	0.95	
Nombres de paires de pôles	p	204	-
Nombres d'encoches/pôle/phase	N_{ep}	1	-
Densité linéique de courant	A_1	60e3	A/m
Densité surfacique de courant	J_1	4e6	A/m ²
Induction dans la culasse	B_y	1.4	T
Induction max dans l'entrefer	B_g	0.8	T
Coefficient de bobinage	k_{w1}	1	-
Type d'aimant permanent	NdFeB	-	-
Induction rémanente d'aimant	B_r	1.1	T
Perméabilité relative d'aimant	μ_r	1.05	
Rapport rayon d'alésage / longueur active	r_{rl}	5	-

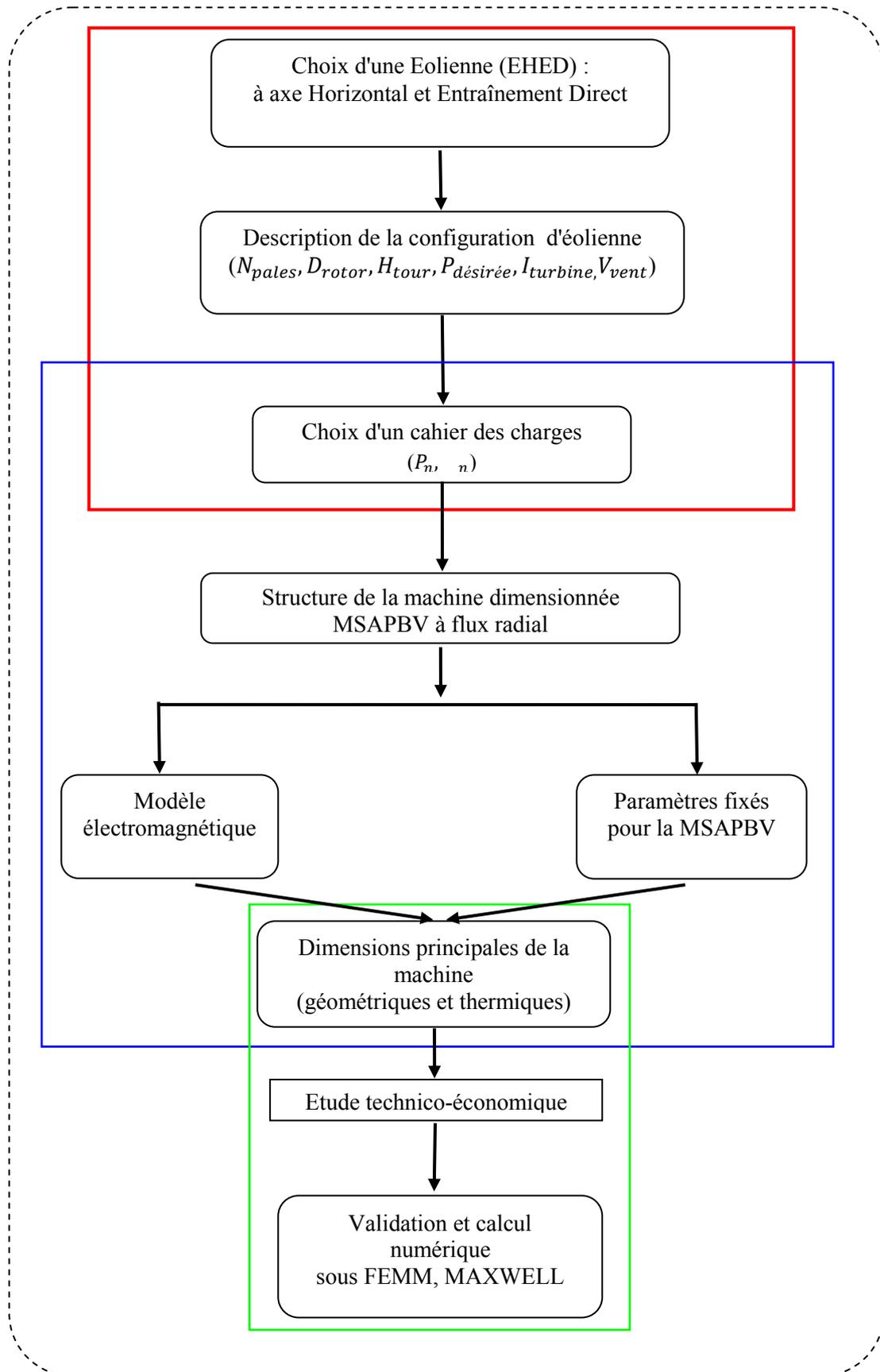


Figure -II.6- Organigramme des différentes étapes de la démarche de conception.

II.5 Dimensionnement analytique de la MSAPBV

II.5.1 Modèle analytique & équation de dimensionnement

V. B. Honsinger a développé en 1987 une équation de dimensionnement pour les machines à induction [97]. Dans ce travail, nous avons appliqué cette approche de dimensionnement pour notre machine synchrone à AP car il serait difficile de disposer d'une formule générale valable pour toutes les machines. [17], [98 -100].

La valeur crête de la FEM fondamentale d'une phase dans l'entrefer est donnée par (II.1) :

$$\hat{E}_1 = N_t k_{w1} \omega \hat{\phi}_1 \quad (\text{II.1})$$

Où :

N_t est le nombre de spires par phase

k_{w1} est le facteur de distribution de bobinage

ω est la pulsation électrique liée au nombre de paires de pôles p et à la vitesse angulaire Ω par l'équation (II.2) :

$$\omega = p\Omega \quad (\text{II.2})$$

$\hat{\phi}$ est la valeur crête du flux magnétique par pôle produit par les aimants et qui est exprimée par l'équation (II.3) :

$$\hat{\phi} = \hat{B}_{g1} L \tau_p \quad (\text{II.3})$$

Où:

\hat{B}_{g1} est l'induction fondamentale dans l'entrefer

L est la longueur active de la machine

D est le diamètre d'alésage

τ_p est le pas polaire donné par l'équation suivante (II.4)

$$\tau_p = \pi D / 2p \quad (\text{II.4})$$

La valeur crête du fondamental de l'induction créée par l'aimant dans l'entrefer B_{g1} est liée à la valeur max d'induction B_m et au demi-angle de pôle α (angle choisi voisin de $\pi/3$) ; elle est donnée, suite à une décomposition en séries de Fourier, par l'expression suivante (II.5) :

$$\hat{B}_{g1} = \left(\frac{\pi}{4} \right) B_m \sin \alpha \quad (\text{II.5})$$

La valeur crête du courant de phase est donnée par (II.6) :

$$\hat{I}_1 = \hat{A}_1 \pi D / 2N_t m_i \quad (\text{II.6})$$

Où:

\hat{A}_1 est la densité linéique de courant

m_i est le nombre de phases

Sachant que l'expression de la puissance de sortie d'une machine de m_i -phase est (II.7) :

$$P_{MSAPBV} = \eta_1 \left(\frac{m_i}{2} \right) \hat{E}_1 \hat{I}_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{II.7})$$

Où:

η_1 est le rendement

φ_1 est le facteur de puissance

En combinant les équations précédentes, on peut réarranger (II.7) selon (II.8) :

$$P_{MSAPBV} = \eta_1 \left(\frac{\pi^2}{8} \right) k_{w1} \hat{B}_{g1} \hat{A}_1 D^2 L \Omega \cos \varphi_1 \quad (\text{II.8})$$

Finalement, (II.8) est l'équation générale de dimensionnement de la MSAPBV qui est développée en fonction des principales dimensions représentées par le volume D^2L .

Le dimensionnement de la MSAP passe généralement par deux étapes principales [36, 44] :

❖ La première étape du dimensionnement consiste en un pré-dimensionnement sur la base d'un *modèle analytique*. Il s'agit de solutions préliminaire exactes des équations physiques de la MSAP, en faisant au préalable des hypothèses simplificatrices sur la structure et les propriétés physiques de celle-ci.

❖ La deuxième étape du dimensionnement fait appel aux *modèles numériques*. Les équations physiques de base du moteur sont résolues avec un faible niveau d'hypothèses en utilisant des algorithmes numériques lourds. La méthode des éléments finis et la méthode des différences finies sont des exemples de méthodes numériques très utilisées, permettant la prise en compte des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques ou thermiques, souvent couplés. Ces méthodes reposent en général sur la décomposition de la structure géométrique en petites régions (surfaces ou volumes finis) sur lesquelles on suppose une évolution donnée du champ. En regroupant les équations de toutes les régions et en utilisant les conditions aux limites du problème, on peut trouver une valeur approchée du champ dans tous les nœuds et par suite dans toutes les mailles de la structure. Ces modèles sont d'autant plus précis que le maillage de la structure est fin et se présentent le plus souvent sous la forme de logiciels génériques dans lesquels on ne fait que décrire la structure géométrique et ses propriétés physiques. En revanche, ils n'offrent pas de lien explicite entre les paramètres mais permettent une analyse détaillée du comportement électromagnétique de la machine pré-dimensionnée et la détermination de ses caractéristiques électromagnétiques.

Ce modèle de dimensionnement a été développé à partir des données de la puissance et la vitesse. Nous allons, dans un premier temps, présenter le modèle géométrique de la machine selon la Figure -II.7-. On commence avec le rayon d'alésage qui correspond à la puissance de dimensionnement, la densité du flux d'entrefer, la densité linéique de courant, la vitesse angulaire et le rapport rayon d'alésage / longueur active, selon l'équation (II.9) :

$$r_b = (2r_{r1}P_1 / (\pi^2 k_{w1} \hat{B}_{g1} \hat{A}_1 \Omega \cos \varphi_1))^{1/3} \quad (\text{II.9})$$

La longueur active de la génératrice L est calculée par la relation suivante (II.10) :

$$L = \frac{r_b}{r_{rl}} \quad (\text{II.10})$$

L'entrefer e est déterminé par une relation empirique (II.11) :

$$e = 0.001 + 0.003\sqrt{r_b L} \quad (\text{II.11})$$

La profondeur de la culasse statorique est choisie égale à la profondeur de la culasse rotorique ; elle est estimée selon (II.12) :

$$s_y = (\pi r_b / 2p)(B_{g1} / B_y) \alpha_m \quad (\text{II.12})$$

Où α_m est l'angle correspondant au coefficient de remplissage d'un pôle d'aimant.

La profondeur des encoches s_h est donnée par (II.13) :

$$s_h = A_1 / (J_s k_r k_{enc}) \quad (\text{II.13})$$

Les largeurs d'une dent et d'une encoche sont supposées égales (III.14) :

$$s_w = \pi r_b / (3p) \quad (\text{II.14})$$

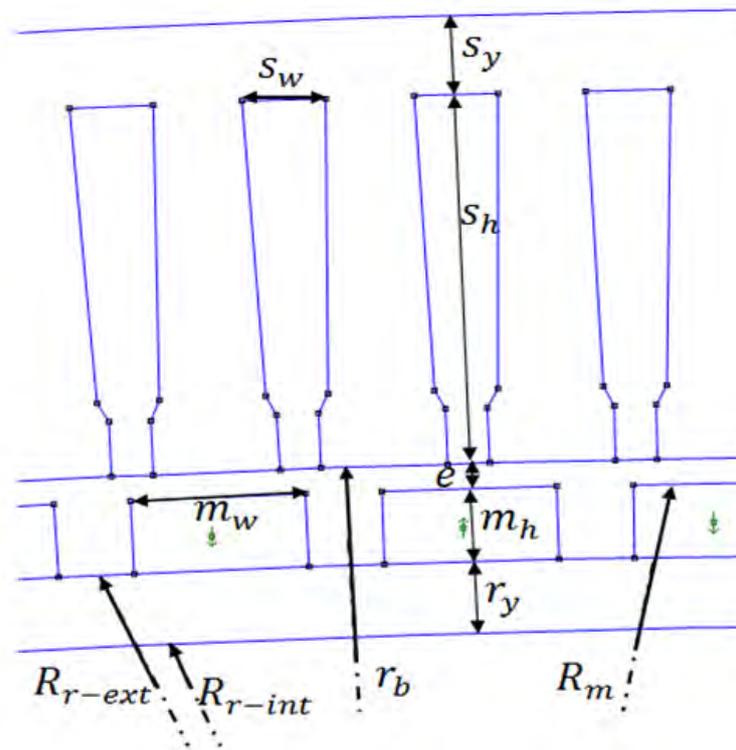


Figure -II.7- Principales dimensions du prototype de MSAPBV.

D'autre part, le choix du type d'aimant est très important pour la conception de ce type de machine synchrone ; il est caractérisé par ses propriétés physiques, perméabilité relative μ_r et induction rémanente B_r , dont les valeurs ont été spécifiées dans le Tableau II.3. Son épaisseur est donnée par l'expression (II.15) :

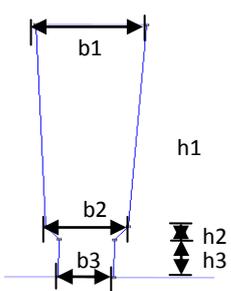
$$m_h = k_c e \frac{\mu_r}{\left(\frac{\beta_r}{B_{g1}} - 1\right)} \quad (\text{II.15})$$

et sa largeur est exprimée par (II.16) :

$$m_w = \frac{0.7(\pi(r_b - m_h - e))}{p} \quad (\text{II.16})$$

Finalement, le nombre et les dimensions des encoches sont fournis par le Tableau II.4.

Tableau II.4. Dimensions des encoches

Paramètres	Schéma encoche	Valeurs
N_{enc}		$1.5p2$
h_1		$h_1 = 8s_h k_r / 5$
h_2		$h_2 = s_w / 4$
h_3		$h_3 = s_h - (h_1 + h_2)$
b_1		$b_1 = s_w$
b_2		$b_2 = 3s_w / 4$
b_3		$b_3 = s_w / 2$

II.5.2 Calcul des volumes et masses des différentes parties de la MSAPBV [33, 44]

Le modèle et les dimensions géométriques de la machine établis précédemment vont nous permettre d'estimer les volumes et les masses de chaque partie de la MSAPBV (stator, rotor, aimant) ainsi que le coût des parties actives, ce qui entre dans le cadre d'une étude technico-économique.

II.5.2.1 Volume et masse du stator

Le stator est décomposé en deux matériaux distincts : acier (culasse, dents) et cuivre (encoches, têtes de bobines) ; son volume est donc donné par (II.17) :

$$V_s = V_{s\text{-acier}} + V_{s\text{-cuivre}} \quad (\text{II.17})$$

A leur tour, le volume de l'acier peut être décomposé en deux parties distinctes (culasse, dents) alors que le volume de cuivre peut être décomposé en deux parties distinctes (slots, têtes de bobines) selon les expressions suivantes:

$$v_{s\text{-acier}} = v_{s\text{-culasse}} + v_{s\text{-dents}} \quad (\text{II.18})$$

$$v_{s\text{-dents}} = v_{f\text{-dents}} + v_{c\text{-dents}} \quad (\text{II.19})$$

$$v_{s\text{-cuivre}} = v_{\text{slot-cuivre}} + v_{\text{têtes-cuivre}} \quad (\text{II.20})$$

Qui peuvent être approchées comme suit (II.21) :

$$\begin{cases} v_{s\text{-culasse}} = 2\pi L s_y (r_b + s_h + (s_y/2)) \\ v_{f\text{-dents}} = N_{enc} r_b \theta_b (2h_2 + h_3)(L/2) \\ v_{c\text{-dents}} = \pi L (r_b (s_h - (h_2 + h_3)) + (s_h^2 + (h_2 + h_3)^2)/2) \\ v_{\text{slot-cuivre}} = \pi L s_h k_r (s_h + (r_b/2)) \\ v_{\text{têtes-cuivre}} = \pi l_{wh} s_h s_w N_{enc} k_r \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Où θ_b est l'épanouissement angulaire au pied d'une dent qui est estimé pour calculer le volume des pieds de dents $v_{f\text{-dents}}$ selon l'expression (II.22) :

$$\theta_b = \frac{2\pi}{N_{enc}} - \frac{b_3}{r_s} \quad (\text{II.22})$$

Et k_r définissant le coefficient de remplissage des encoches.

Le volume des têtes de bobines $v_{\text{têtes-cuivre}}$ est calculé à partir de leur longueur l_{wh} et s'exprime par (II.23) :

$$l_{wh} = \frac{\pi^2 (r_b + 0.5s_h)}{2p} \quad (\text{II.23})$$

Finalement, la masse totale du stator s'exprime facilement en fonction de la masse volumique d'acier ρ_{ac} et de cuivre ρ_{cui} selon (II.24) :

$$M_s = M_{s-acier} + M_{cuivre} \quad (II.24)$$

$$\text{Où: } \begin{cases} M_{s-acier} = v_{s-acier} \rho_{ac} \\ M_{cuivre} = v_{s-cuivre} \rho_{cui} \end{cases} \quad (II.25)$$

II.5.2.2 Volume et masse du rotor

Le rotor est décomposé en deux matériaux distincts : acier (culasse) et matériaux magnétique (aimant) ; ainsi, le volume du rotor est donné par (II.26) :

$$v_r = v_{r-acier} + v_{aimant} \quad (II.26)$$

Où les volumes d'acier du rotor et d'aimant sont calculés par (II.27) :

$$\begin{cases} v_{r-acier} = \pi L (R_{r-ext}^2 - R_{r-int}^2) \\ v_{aimant} = \pi L k_p (R_m^2 - R_{r-ext}^2) \end{cases} \quad (II.27)$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} R_{r-ext} = r_b - (e + m_h) \\ R_{r-int} = R_{r-ext} - r_y \\ R_m = r_b - e \end{cases} \quad (II.28)$$

Où R_{r-ext} , R_{r-int} et R_m sont respectivement le rayon extérieur du rotor, le rayon intérieur du rotor et le rayon extérieur des aimants comme représenté la Figure -II.7-.

A partir de là, la masse totale du rotor s'exprimera facilement en fonction de la masse volumique d'acier ρ_{ac} et d'aimant ρ_{aim} selon (II.29) :

$$M_r = M_{r-acier} + M_{aimant} \quad (II.29)$$

$$\text{Où: } \begin{cases} M_{r-acier} = v_{r-acier} \rho_{ac} \\ M_{aimant} = v_{aimant} \rho_{aim} \end{cases} \quad (II.30)$$

II.5.2.3 Masse totale de la MSAPBV

La masse active de la MSAPBV est la somme des masses des différents éléments actifs statorique et rotorique ; cette masse totale vaut alors (II.31) :

$$M_{MSAPBV} = M_s + M_r \tag{II.31}$$

II.5.3 Analyse des résultats analytiques

Les résultats analytiques obtenus à l'aide d'un code de calcul que nous avons réalisé sous l'environnement MATLAB à partir de l'équation de dimensionnement (II.8) de notre MSAPBV sont résumés dans le tableau II.5.

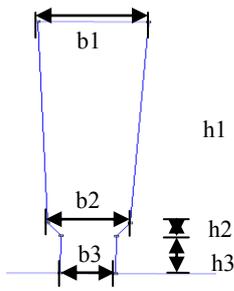
Tableau II.5. Principales dimensions géométriques du prototype de MSAPBV

Paramètres	Notation	Valeurs	Unités
Rayon d'alésage	r_b	2.7808	m
Longueur active	L	0.5562	m
Epaisseur de la culasse statorique	s_y	0.0135	m
Profondeur des encoches	s_h	0.0700	m
Largeurs des dents et d'encoches	s_w	0.0143	m
Entrefer	e	0.0047	m
Epaisseur de l'aimant	m_h	0.0139	m
Largeur d'aimant	m_w	0.0298	m

Le nombre et les dimensions des encoches sont donnés dans le tableau II.6.

Tableau II.6. Principales dimensions géométriques d'une encoche

Paramètres	Valeurs (m)
N_{enc}	612
h1	[0.0560]
h2	[0.0036]
h3	h1 [0.0104]
b1	[0.0143]
b2	[0.0107]
b3	[0.0071]



Ce modèle permettra d'estimer les masses ainsi que le coût des parties actives (étude technico-économique) dont les résultats sont illustrés par les figures -II.8- et -II.9-.

À partir de ces résultats qui sont basés sur l'équation de dimensionnement de la MSAPBV où il est à noter que la réalisation d'une conception optimale reste très difficile à réaliser en raison du grand nombre de variables, de contraintes et de couplage des phénomènes physiques, nous avons pu développer l'équation de conception de la MSAPBV ; les résultats analytiques obtenus sont rassemblés dans les tableaux II.5. II.6. et II.7 suivants.

Tableau II.7. Masses des parties actives de la MSAPBV

Paramètres	Valeurs	Unités
$M_{r-acier}$	989.8976	kg
M_{aimant}	657.4534	kg
M_r	1.6474e+3	kg
$M_{s-culasse}$	1.0340e+3	kg
$M_{s-dents}$	2.5391e+3	kg
M_{cuivre}	1.7114e+3	kg
M_s	5.2845e+3	kg
M_{MSAPBV}	6.9319e+3	kg

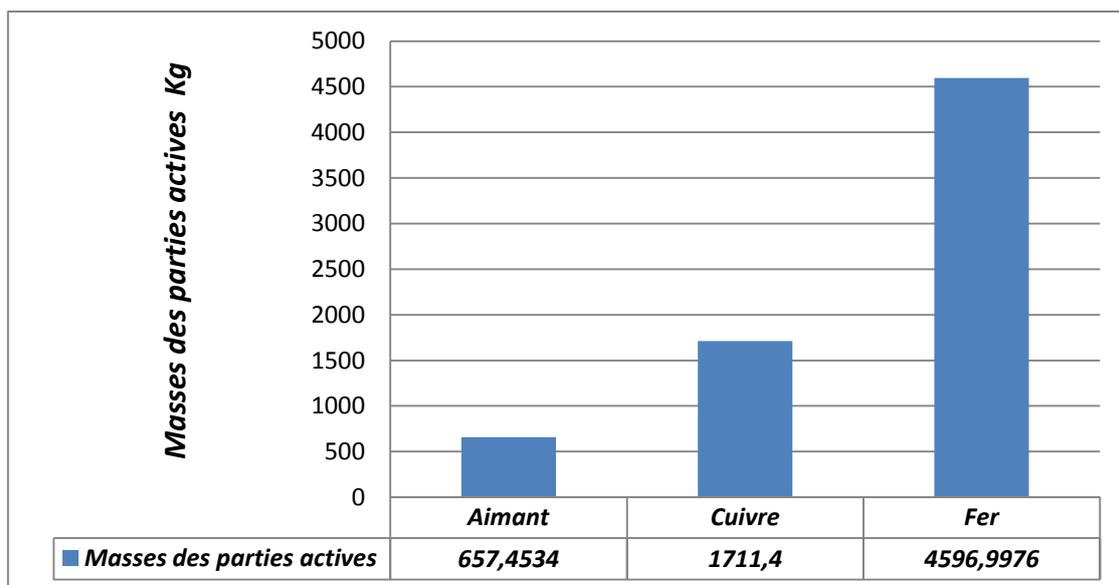


Figure -II.8- Masses des parties actives de la MSAPBV (kg).

Pour l'estimation du coût des parties actives, on peut utiliser le Tableau II.8 suivant :

Tableau II.8. Coûts des matériaux actifs

Cuivre	6.0	€/kg
Acier	0.5	€/kg
Aimant	87.0	€/kg

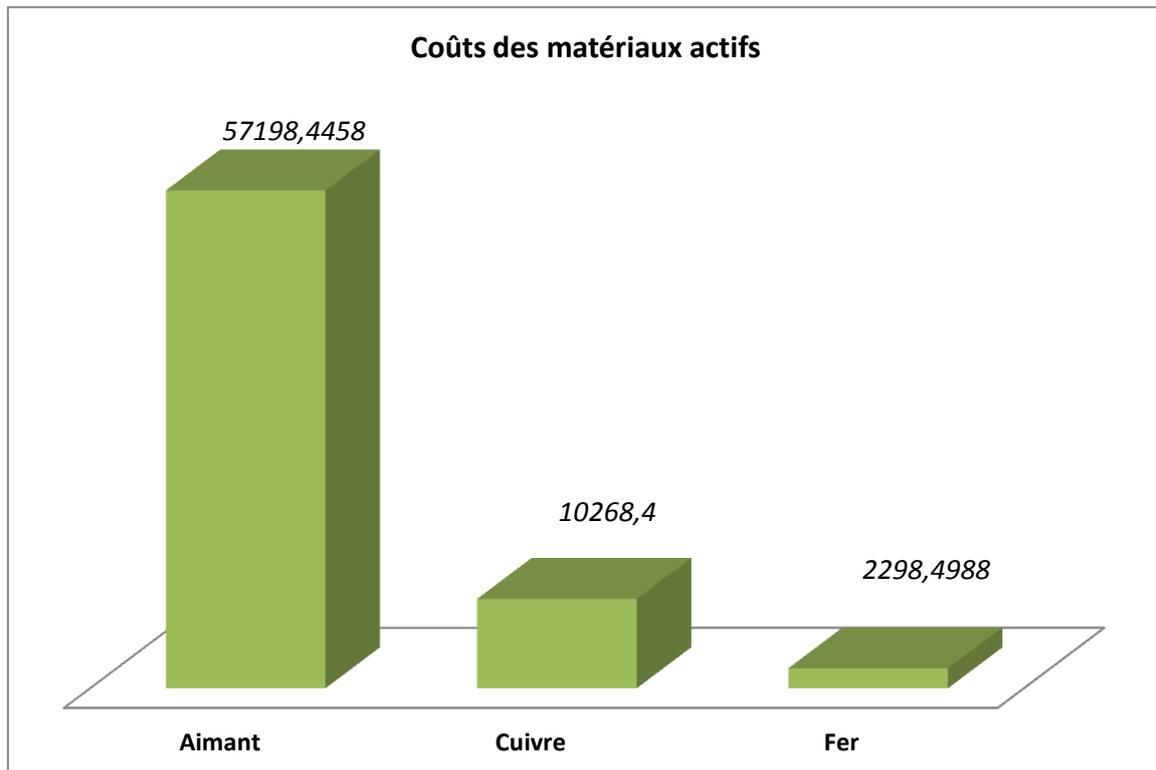


Figure -II.9- Coûts des parties actives de la MSAPBV (€).

Par une simple étude comparative entre la masse et le coût des parties actives de la MSAPBV, on trouve que 66% de la masse totale de la machine représentent l'acier alors que seulement 9% de la masse totale représentent l'aimant comme schématisé dans la Figure -II.10-. D'autre part, si on parle du coût, on trouve que 82% du coût total de la MSAPBV représentent l'aimant alors que seulement 3% est représenté de l'acier comme indiqué dans la Figure -II.11-.

Et pour bien vérifier les résultats obtenus, nous allons utiliser la méthode des éléments finis pour une représentation de la machine en 2D ainsi que pour la validation de nos résultats analytiques à l'aide d'une méthode numérique.

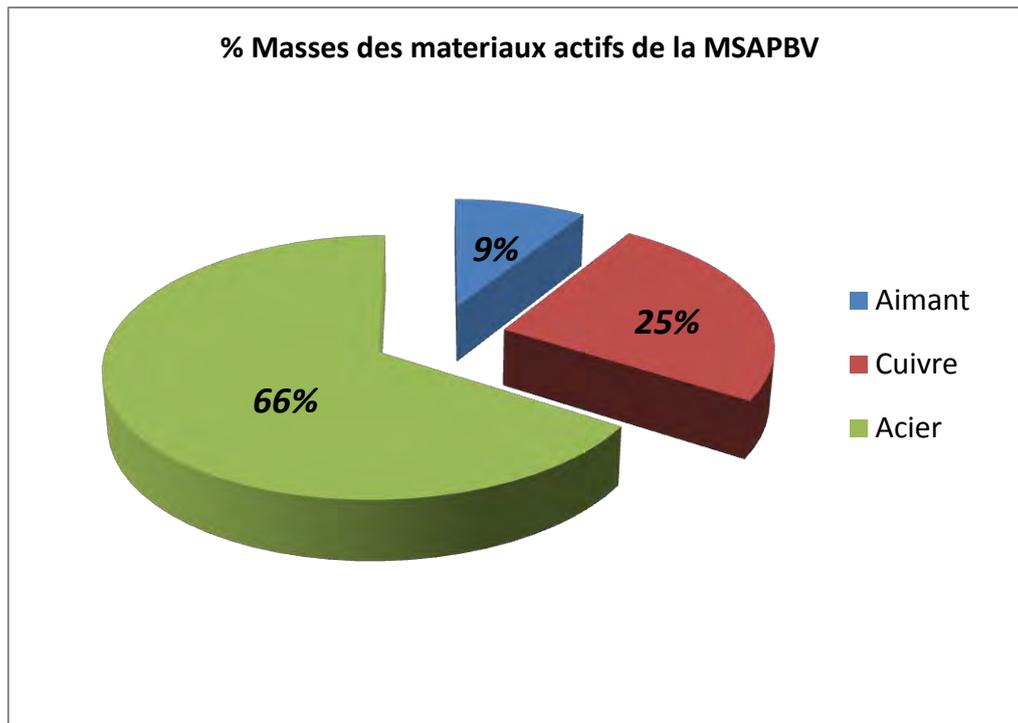


Figure -II.10- Masses des matériaux actifs de la MSAPBV.

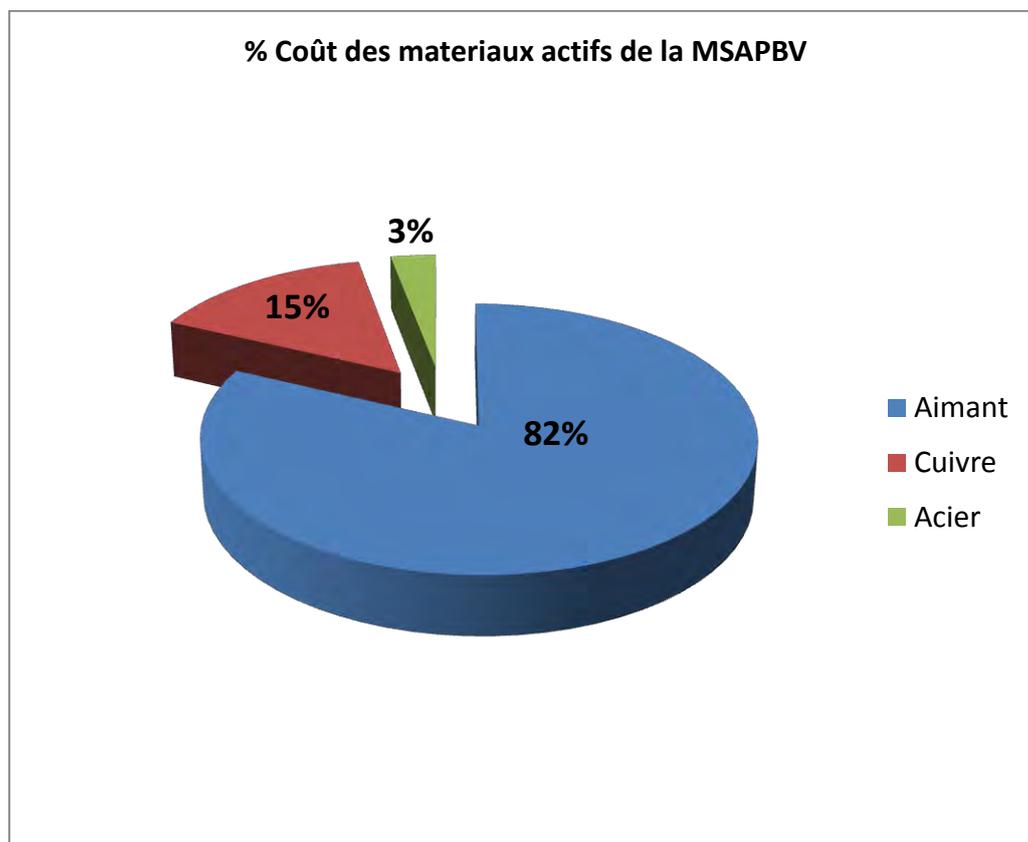


Figure -II.11- Coûts des parties actives de la MSAPBV.

II.6 Simulation numérique par éléments finis [41, 101 -105]

Dans cette partie, nous allons présenter la deuxième étape du dimensionnement consacrée à la modélisation numérique par la méthode des éléments finis afin de valider les résultats obtenus par l'approche analytique.

II.6.1 Méthodes numériques

La prédétermination du comportement d'un dispositif électromagnétique à partir des données de sa géométrie et des propriétés physiques de ses matériaux, connecté de surcroît à des sources et charges externes, a toujours été un problème difficile à résoudre vu le couplage de divers phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques,... : on parle alors de problème multiphysique. A titre indicatif, nous citerons les phénomènes liés :

- à la saturation (non-linéarité de la caractéristique magnétique)
- aux courants de Foucault (induits dans les conducteurs massifs)
- aux effets d'extrémités (tridimensionnels)
- aux échauffements thermiques (influence sur la résistivité) ou de prise en compte du mouvement (problème dynamique).

Dans l'état actuel des connaissances des techniques informatiques et numériques, la complexité du problème traité exige encore des simplifications pour rendre possible le calcul des paramètres de la machine à partir de la résolution des équations régissant son fonctionnement. Nous distinguons :

- ✓ **les méthodes analytiques** : de transformations conformes, des images ou de séparation des variables qui sont souvent inopérantes dès que la complexité du problème augmente avec la géométrie, les caractéristiques non linéaires des matériaux, ... ;
- ✓ **les méthodes numériques** : basées sur des procédés de discrétisation et d'approximation qui transforment les *Equations aux Dérivées Partielles (EDP)* régissant le fonctionnement du dispositif à étudier et écrites sous forme intégrale en un système d'équations algébriques dont la résolution permettra de connaître la variable aux nœuds du maillage.

Pour ces dernières, on peut citer :

- **la méthode des différences finies** : utilise une discrétisation des EDP du champ avec comme principal inconvénient de mal s'adapter aux géométries complexes des machines; elle est souvent associée à la méthode des éléments finis (MEF) pour résoudre des problèmes d'évolution dans le temps ;
- **la méthode des éléments finis (MEF)** : est une méthode utilisée depuis longtemps par les mécaniciens avant d'être appliquée vers les années 70 au domaine de l'électromagnétisme. Elle procède d'abord par une formulation variationnelle ou projective du problème physique associé ; concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, où la méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments finis (également appelés mailles) et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème.

C'est cette dernière méthode que nous utilisons pour simuler à l'aide d'un couplage judicieux de deux logiciels MATLAB et FEMM la MSAPBV étudiée dans le cadre de cette thèse.

II.6.2 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) permet de résoudre de manière discrète et approchée les équations du champ régissant le fonctionnement de notre machine MSAPBV, selon les étapes suivantes :

- discrétisation : elle consiste à découper le domaine d'étude D en éléments e (triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes) reliés entre eux par un nombre fini de points où les potentiels nodaux A_k sont les inconnues du problème comme représenté Figure -II.12- ;
- approximation: de l'inconnue par interpolation polynomiale sur chaque élément (e) $A^e \approx \sum N_k A_k$ où les $N_k(x_k, y_k)$ représentent les fonctions de formes ;
- écriture sous forme intégrale des EDP selon une des deux formulations suivantes :

- **variationnelle** qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié ;
 - **projective** ou des résidus pondérés (type Galerkin) qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.
- assemblage : des intégrales élémentaires pour obtenir la fonctionnelle totale
- $$\iint_s \rightarrow \sum \iint_e$$
- résolution : du système d'équations algébriques écrit sous forme matricielle, après prise en compte des conditions aux limites, de périodicité,...

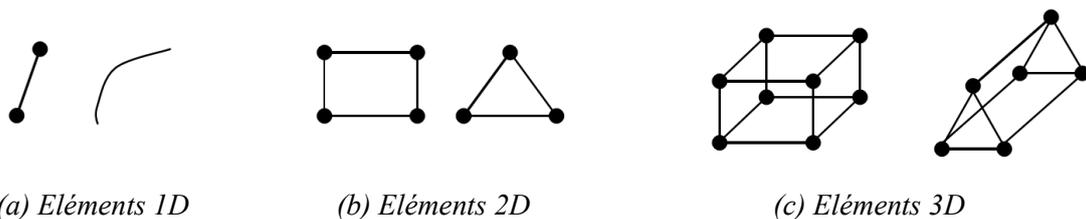


Figure -II.12- Eléments de référence du 1^{er} ordre.

II.6.3 Equations électromagnétiques

La simulation électromagnétique fait appel au calcul des champs créés dans les diverses parties du système étudié. Il s'agit des équations de Maxwell régissant les phénomènes électromagnétiques étudiés ici. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme et sont données par les 4 équations suivantes :

- de couplage : $\text{rot}H = J$ (II.32)

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{II.33})$$

- de conservation : $\text{div}B = 0$ (II.34)

$$\text{div}D = \rho \quad (\text{II.35})$$

Où les vecteurs en gras représentent le champ magnétique \mathbf{H} , l'induction magnétique \mathbf{B} , le champ électrique \mathbf{E} , l'induction électrique \mathbf{D} et la densité de courant \mathbf{J} , avec ρ la densité volumique de charge électrique.

En supposant l'aimantation B_r négligeable et les matériaux isotropes, c'est-à-dire que les propriétés des milieux conducteurs (conductivité σ) et magnétiques (perméabilité μ) sont des grandeurs scalaires et non tensorielles, nous pouvons leur associer les deux relations :

- *caractéristique magnétique* :

$$B = \mu H \quad (\text{II.36})$$

- *loi d'Ohm locale* :

$$J = \sigma E \quad (\text{II.37})$$

On parlera d'un milieu parfait (ou idéal) s'il est isotrope, homogène et linéaire.

De l'équation (II.34) de conservation du flux de \mathbf{B} , nous déduisons l'existence d'un potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} tel que :

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad (\text{II.38})$$

Dont l'unicité est souvent garantie par la jauge de Coulomb (il existe aussi celle de Lorentz) :

$$\text{div} \mathbf{A} = 0 \quad (\text{II.39})$$

En combinant toutes ces relations, nous aboutissons à l'équation bien connue de Poisson, régissant le fonctionnement d'un système magnétostatique vectoriel :

$$\text{Rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right] = \mathbf{J} \quad (\text{II.40})$$

Par ailleurs, les relations (II.33) et (II.38) conduisent à :

$$\text{Rot} (\mathbf{E} + \partial \mathbf{A} / \partial t) = 0 \quad (\text{II.41})$$

D'où l'existence d'un potentiel scalaire électrique V tel que :

$$\mathbf{E} + (\partial \mathbf{A} / \partial t) = -\text{grad} V \quad (\text{II.42})$$

On parlera alors d'une formulation \mathbf{A} - V très utilisée par les électrotechniciens.

En remplaçant l'expression du champ électrique \mathbf{E} donnée par (II.32) dans la loi d'Ohm (II.37), l'équation de Poisson (II.40) devient :

$$\text{Rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right] = -\sigma \cdot (\partial \mathbf{A} / \partial t) - \sigma \cdot \text{grad} V \quad (\text{II.43})$$

Où le terme dynamique $\sigma \cdot (\partial A / \partial t)$ représente la densité des courants de Foucault induits, alors que le terme $\sigma \cdot \text{grad}V$ représente la densité de courant source, J_s , dû à la tension V appliquée aux conducteurs et à l'effet du champ magnétique de couplage.

En toute rigueur, tout système électromagnétique est tridimensionnel (3D). Mais les dispositifs électrotechniques classiques privilégient généralement une direction particulière des champs ou des courants : une connaissance précise de la grandeur étudiée dans le plan privilégié associée à une approximation dans la direction orthogonale (on parle souvent de négliger les effets d'extrémités) conduit à l'étude d'un système bidimensionnel (2D).

Le système étudié étant supposé être excité à partir d'une densité de courant source J_s dirigée selon l'axe Oz , on montre qu'il en sera de même pour le potentiel vecteur magnétique $A(x, y)$ qui représente l'inconnue de notre problème ; nous pouvons dès lors assimiler ces deux grandeurs vectorielles à des scalaires. Dans ce cas, l'équation (II.43) deviendra :

$$\frac{\partial}{\partial x} (v(|\vec{B}|) \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v(|\vec{B}|) \frac{\partial A}{\partial y}) = J \quad (\text{II.44})$$

Où J est égal à J_s ou 0 suivant que l'on se trouve dans un conducteur statorique ou dans un milieu où la densité de courant est nulle. La relation $(v(|\vec{B}|))$ tient compte de la courbe de saturation du matériau magnétique utilisé et crée une relation non linéaire.

Afin que la solution de problème soit unique, on spécifie des *conditions aux limites* qui décrivent le comportement du potentiel vecteur et de ses dérivées sur les frontières du domaine d'étude (type *Dirichlet*, *Neumann*, *mixtes*, *cycliques* ou *non*, ...).

II.6.4 Modèle de la MSAPBV étudiée

Les premières simulations ont été réalisées en 2D par le logiciel de calcul par éléments finis FEMM. Après quoi, nous avons introduit toutes les dimensions obtenues par nos calculs analytiques, ce qui nous a permis de voir la machine pour la première fois. Dans toutes les simulations réalisées, on n'a modélisé, pour des raisons de temps de calcul et d'efficacité du processus de conception, qu'une partie de la machine tenant compte des symétries existantes. Les géométries de la MSAPBV en 2D est représentée dans la Figure -II.13-.

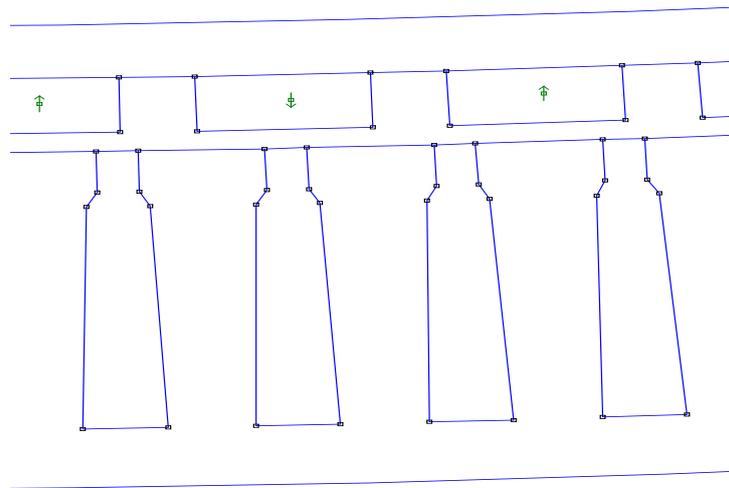


Figure -II.13- Structures de la MSAPBV en 2D.

Le découpage du domaine en éléments finis est une étape essentielle car la précision des calculs dépend de sa finesse. Nous avons utilisé un maillage de 1187135 éléments comme illustré sur la Figure -II.14-.

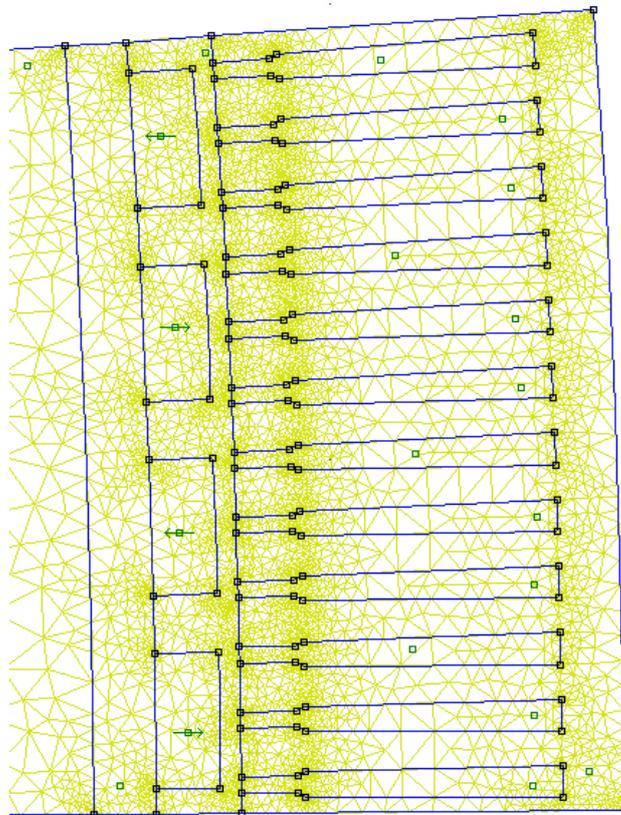


Figure - II.14- Maillage du domaine d'étude en 2D.

II.6.5 Analyse des résultats numériques

Après le maillage de notre système et spécification des conditions aux limites sur les frontières du domaine d'étude, nous avons représenté les lignes de champ dans la Figure - II.15-. et de densité de flux dans la Figure -II.16-. dans différents région de la MSAPBV.

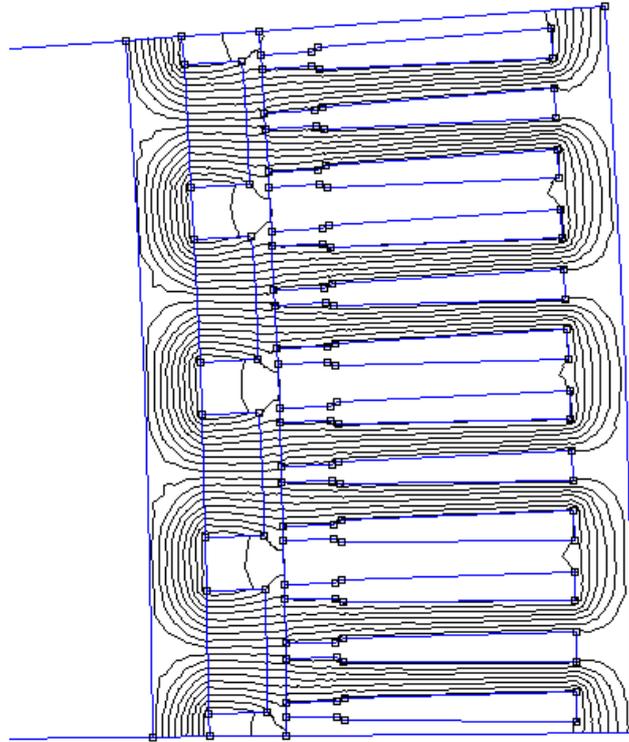


Figure - II.15- Distribution des lignes de champ magnétique.

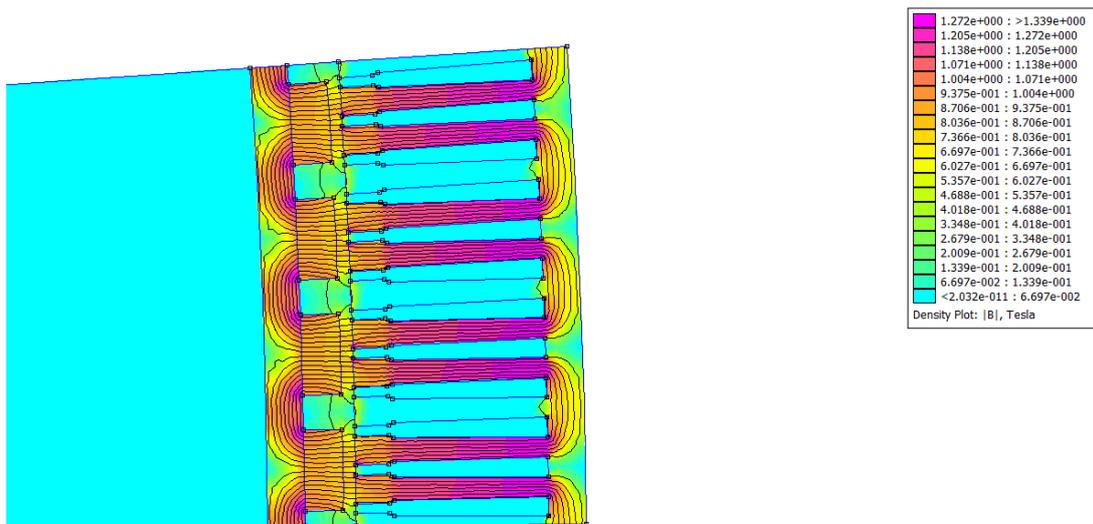


Figure - II.16- Distribution de la densité de flux magnétique.

A partir des simulations précédentes, nous avons vu la forme de la MSAPBV en 2D avec une cartographie qui corrige le démarche analytique adoptée.

La Figure -II.17-, représente une comparaison entre les masses des parties actives de la MSAPBV calculées analytiquement et numériquement avec un écart très faible qui valide notre démarche analytique. Mais le coût de la machine est fortement grevé par celui de l'aimant permanent qui représente une grande fraction du coût total de la MSAPBV selon le tableau II.8. Remarquons aussi que moins de 10% de la masse de la MSAPBV est la masse de l'aimant alors que plus de 80% du prix de la MSAPBV est le coût de l'aimant selon les Figures -II.10- et -II.11- .

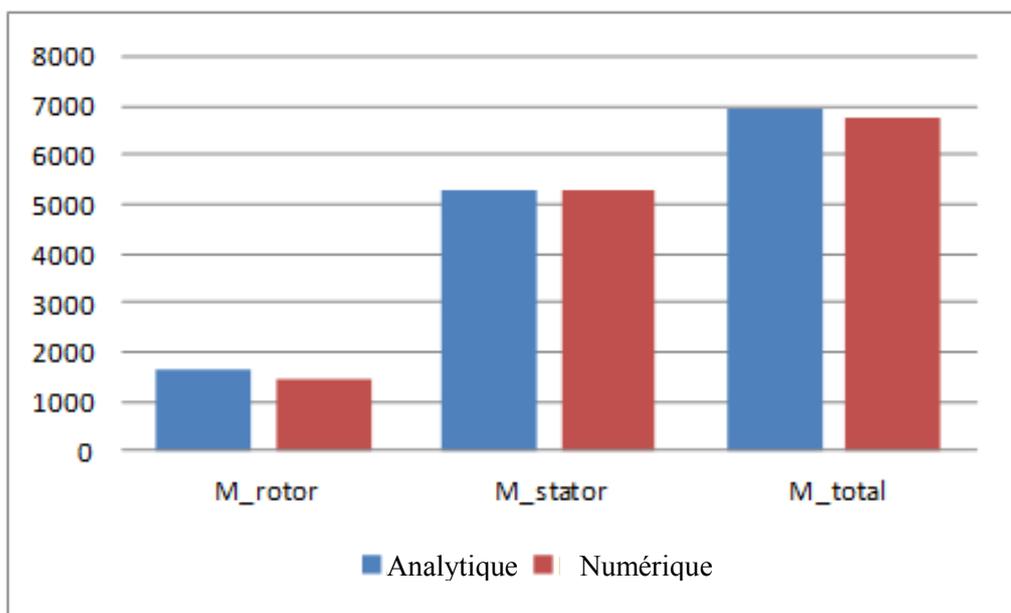


Figure -II.17- Comparaison analytico-numérique des masses des parties actives.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé le dimensionnement d'une génératrice synchrone à aimants permanents de grande puissance (1,5 MW) entraînée à faible vitesse (1,55 rad/s) et sans réducteur (entraînement direct) par une turbine éolienne tripale à axe horizontal du constructeur NREL.

La méthodologie adoptée ici a permis d'établir un modèle analytique de dimensionnement géométrique qui a été ensuite utilisé pour une simulation du fonctionnement de la machine selon un modèle numérique par la méthode des éléments finis. L'analyse des

résultats obtenus grâce à un couplage judicieux et interactif des deux logiciels MATLAB et FEMM a permis de valider notre modèle analytique.

Quoique les avantages de la MSAP ne sont plus à démontrer dans le cas d'une application éolienne qui nous intéresse ici, nous allons dans le chapitre suivant présenter un générateur innovant, type machine à réluctance variable dont les atouts sont non négligeables, puis nous terminerons notre thèse par une étude comparative des deux aérogénérateurs.

Etude et Conception d'une Machine à Reluctance

Variable à Basse Vitesse (MRVBV) de 1.5 MW

pour Éolienne

CHAPITRE III

Etude et Conception d'une Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse (MRVBV) de 1.5 MW pour Éolienne

III.1 Introduction	54
III.2 Spécifications et structure du système éolien	54
III.3 Généralités sur les MRV	54
III.3.1 Principe de fonctionnement	54
III.3.2 Différentes structures de MRV	60
III.3.2.1 MRV Pures	60
III.3.2.2 MRV Vernier	61
III.3.2.3 MRV Hybrides	62
III.3.2.4 MRV à flux axial	63
III.4 Caractéristiques principales de la MRV étudiée	63
III.5 Dimensionnement analytique de la MRVBV	66
III.5.1 Équation de dimensionnement	66
III.5.2 Modèle analytique	70
III.5.3 Calcul des volumes et masses des différentes parties de la MRVBV	73
III.5.3.1 Volume et masse du stator	73
III.5.3.2 Volume et masse du rotor	74
III.5.3.3 Masse totale de la MRVBV	74
III.5.4 Analyse des résultats analytiques	75
III.6 Simulation numérique par éléments finis	80
III.6.1 Modèle de la MRVBV étudiée	80
III.6.2 Résultats graphiques	81
III.7 Conclusion	83

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre est consacré au dimensionnement d'une Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse (MRVBV), donc à grand nombre de pôles et à grand diamètre, à associer à une turbine éolienne de puissance élevée par entraînement direct (direct-drive), sans boîte de vitesses. Après une brève description du système éolien étudié, nous présenterons les différentes topologies de machines à reluctance variable fréquemment utilisées dans l'industrie avant de fixer notre choix sur une structure donnée.

Il s'agira ici d'une Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse (MRVBV) que nous allons dimensionner analytiquement moyennant l'équation de dimensionnement des machines électriques (avec des hypothèses à préciser) et un cahier des charges spécifiant notamment les puissance (1.5 MW) et vitesse (1.55 rad/s). Après avoir calculé les dimensions principales de la MRVBV à partir d'un modèle analytique, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice à partir d'une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis. Les différentes simulations ont été effectuées grâce à un code de calcul que nous avons réalisé sous MATLAB couplé au logiciel éléments finis FEMM. Les résultats obtenus ont été analysés et discutés avec une étude technico-économique.

III.2 Spécifications et structure de système éolien

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, on a déjà présenté les configurations, la méthode de conversion et les caractéristiques des aérogénérateurs dans la section *I.4 Spécification de l'énergie éolienne*. Rappelons que notre choix s'est fixé sur une éolienne à axe horizontal à entraînement direct (*EHED*), les vitesses du vent et de rotation du rotor de la génératrice étant les mêmes. Comme illustré dans la Figure -II.1- et mentionné dans le tableau II.1., on a fourni les caractéristiques de la turbine WP 1.5-MW de NREL.

III.3 Principe et topologies de MRV [41, 42]

III.3.1 Principe de fonctionnement

Historiquement, le principe de la machine à réluctance variable (MRV) a été mis en œuvre depuis environ un siècle pour :

- produire des courants à fréquence élevée (10 kHz) en radioélectricité
- les alternateurs homopolaires à fréquence élevée (fours à induction, ...)

- les actionneurs, relais électromagnétiques, ...

Les MRV ont connu une période de stagnation par rapport aux autres machines avant qu'il n'y ait eu un regain d'intérêt suite aux progrès réalisés en électronique de commande et de puissance, au niveau des matériaux, des modèles et logiciels de simulation qui ont permis la réalisation de :

- générateurs lents à couple élevé (éolien, ...)
- moteurs rapides ($\approx 20\,000$ tr/mn)
- systèmes de transmission d'info. (moteurs pas-à-pas, ...)

Les MRV possèdent de multiples avantages, résumés ainsi :

- ✚ Absence de pertes joules au niveau du rotor
- ✚ Très bon rendement
- ✚ Simple construction et moins de frais d'entretien
- ✚ Sans aimant permanent et ni cuivre dans le rotor
- ✚ Performances comparables à celles des machines classiques asynchrones et synchrones à aimants permanents
- ✚ Peuvent fonctionner dans des environnements très difficiles

Le principe des machines à réluctance variable (SRM en anglais) est basé sur celui de l'électroaimant, selon la règle du « *flux max ou réluctance min* » (Figure -III.1-) ; c'est la plus ancienne méthode de conversion électromécanique d'énergie [1].

Le flux magnétique créée par les ampères-tours stator Ni oscille entre deux valeurs extrêmes correspondant aux deux positions caractéristiques :

- une position d'**opposition** (*unaligned position*) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale ou une inductance minimale L_{min} ;
- une position de **conjonction** (*aligned position*) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale ou une inductance maximale L_{Max} .

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 statorique jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \pi/2$), selon la règle du *flux max* ou de la *reluctance min*, etc.

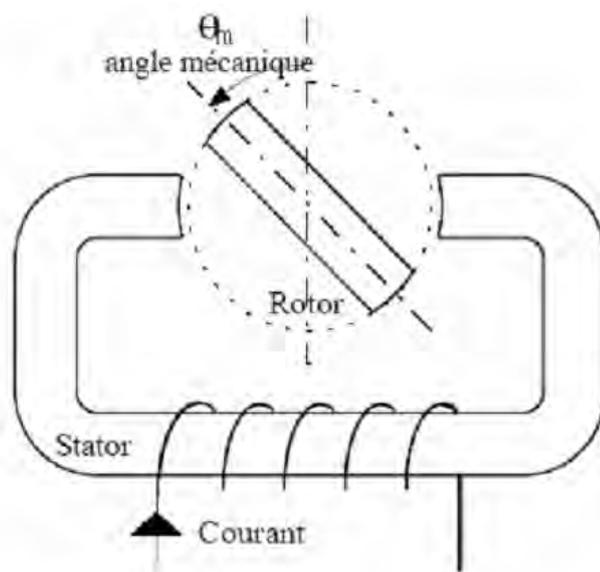


Figure -III.1- Structure élémentaire de la MRV monophasé.

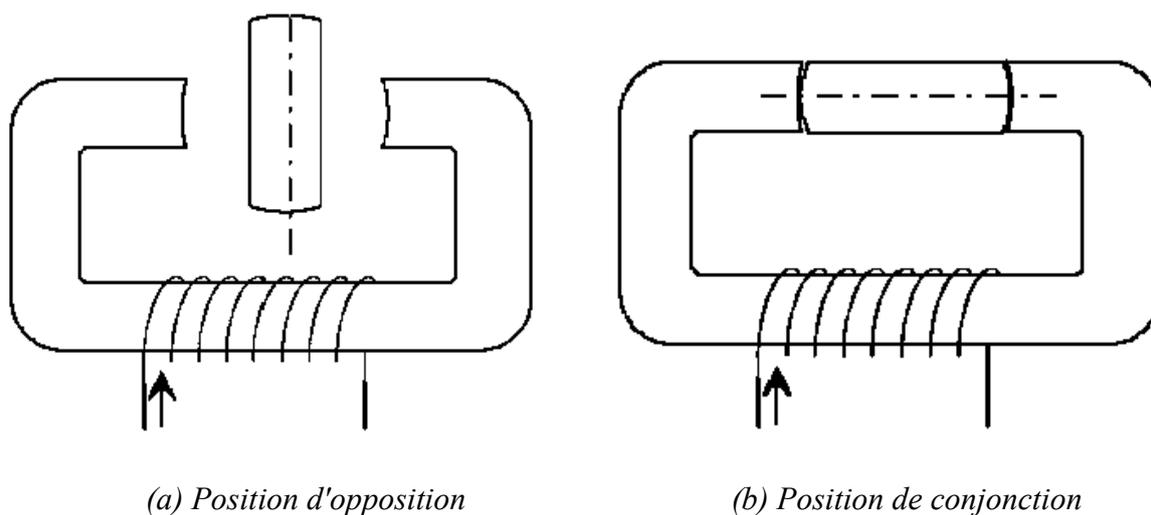


Figure -III.1- MRV de base ($q=1$ phase ; $N_s=N_r=2$ dents) et positions extrêmes du rotor. L'alimentation est donc synchronisée avec la position relative des dentures stator-rotor. L'équation électrique par phase statorique est :

$$v = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Le flux totalisé ψ étant fonction de la position relative des dents θ_m et du courant i on aura :

$$v = Ri + \frac{\partial \psi}{\partial i} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta_m} \cdot \frac{\partial \theta_m}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

où les termes :

$\partial\psi/\partial i = L(\theta, i)$: représente l'inductance dynamique

$e = (\partial\psi/\partial\theta m) \cdot (\partial\theta m/\partial t) = i\Omega(\partial L/\partial\theta)$: fcem proportionnelle à la vitesse $\Omega = \partial\theta m/\partial t$.

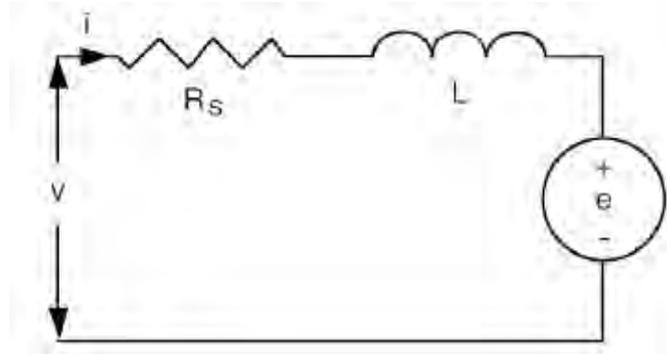


Figure -III.2- Schéma monophasé équivalent.

En multipliant les deux membres de l'équation (III.1) par idt , nous aurons les énergies pour un système monophasé :

$$dW_e = dW_j + i \cdot d\psi \quad (\text{III. 3})$$

En vertu du principe de conservation d'énergie :

$$dW_e = dW_{em} + dW_m \quad (\text{III.4})$$

faisant intervenir les variations d'énergies nettes (pertes incluses).

Des relations (III.3) et (III.4), on déduit :

$$dW_{em} = (i \cdot d\psi - dW_m) \quad (\text{III.5})$$

L'énergie étant une fonction d'état de différentielle totale:

$$dW_{em}(\psi, \theta) = (\partial W_{em}/\partial\psi) \cdot d\psi + (\partial W_{em}/\partial\theta m) \cdot d\theta m \quad (\text{III.6})$$

En identifiant (III.5) et (III.6), l'expression du couple sera :

$$T_e = - \partial W_{em}/\partial\theta m \big|_{\psi=cst} \quad (\text{III.7})$$

De manière analogue, la coénergie magnétique $W_{em}^*(i, \theta)$ donnerait :

$$(W_{em} + W_{em}^*) = i \cdot \psi \Rightarrow T_e = + \partial W_{em}^* / \partial \theta_m \Big|_{i=cst} \quad (III.8)$$

D'où le couple électromagnétique, en régime *linéaire* :

$$T_e = (i^2/2) \cdot (dL/d\theta_m) = Nr(i^2/2) \cdot (dL/d\theta) \quad (III.9)$$

en vertu de la relation entre angles électrique θ et mécanique θ_m : $\theta = Nr \cdot \theta_m$

On montre également que le couple moyen est proportionnel à l'énergie convertie par cycle W qui est égale à la surface du cycle (Figure -III.3-) décrit dans le plan flux (ψ) :

$$\langle T \rangle = q \cdot Nr \cdot W / 2\pi \quad (III.10)$$

En vertu du principe de conversion électromécanique d'énergie, la création de couple est due à une variation d'énergie mécanique (ΔW_{mec}) résultant d'une variation d'énergie magnétique représentée par l'aire (Figure -III.3-) comprise entre les deux courbes $\psi(i, \theta)$ et $\psi(i, \theta + \Delta\theta)$.

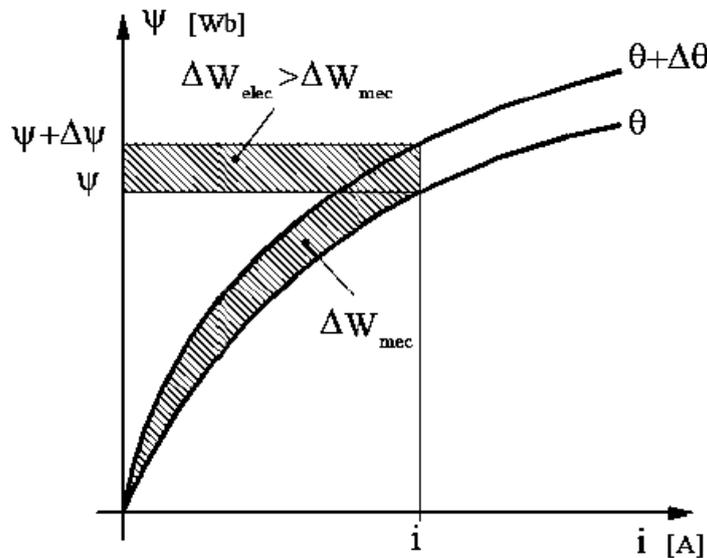


Figure -III.3- Conversion d'énergie dans une MRV.

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est selon (III.9) : $T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_m}$,

l'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (Figure -III.4-) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

- **moteur** ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance ($\partial L / \partial \theta_m > 0$) ;
- **générateur** ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance ($\partial L / \partial \theta_m < 0$).

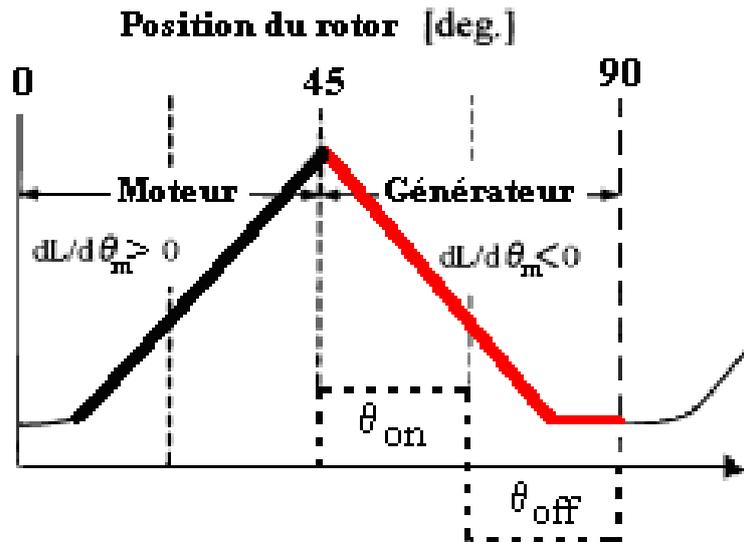


Figure -III.4- Régimes de fonctionnement de la MRV.

En fonctionnement générateur, nous distinguons 2 phases :

- **phase (1) d'excitation ou de magnétisation** : quand $[K_1, K_2]$ fermés le bobinage du stator est excité par un circuit externe selon la Figure -III.5a-; l'énergie électromécanique fournie par le circuit externe est convertie en énergie magnétique ;
- **phase (2) de génération électrique** : quand $[K_1, K_2]$ ouverts et $[D_1, D_2]$ fermées, les énergies magnétique et mécanique sont converties en énergie électrique qui alimente de nouveau la source ou la charge selon la Figure -III.5b-.

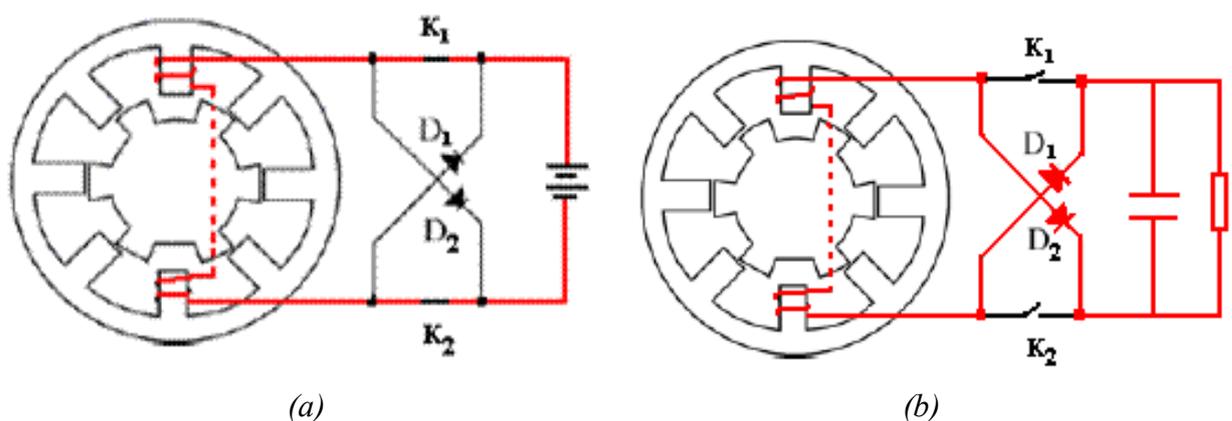


Figure -III.5- Fonctionnement générateur :

(a) magnétisation ; (b) génération

Généralement, le convertisseur statique associé à la MRV est un onduleur en demi-pont asymétrique comme représenté dan la Figure -III.6-.

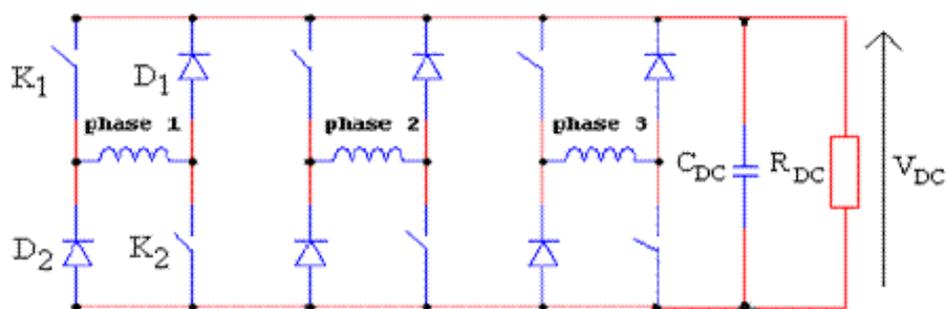


Figure -III.6- Onduleur triphasé asymétrique.

III.3.2 Différentes structures de MRV

III.3.2.1 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.

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.

On distingue différentes structures à MRV pures comme représentées dans la Figure -III.7-.

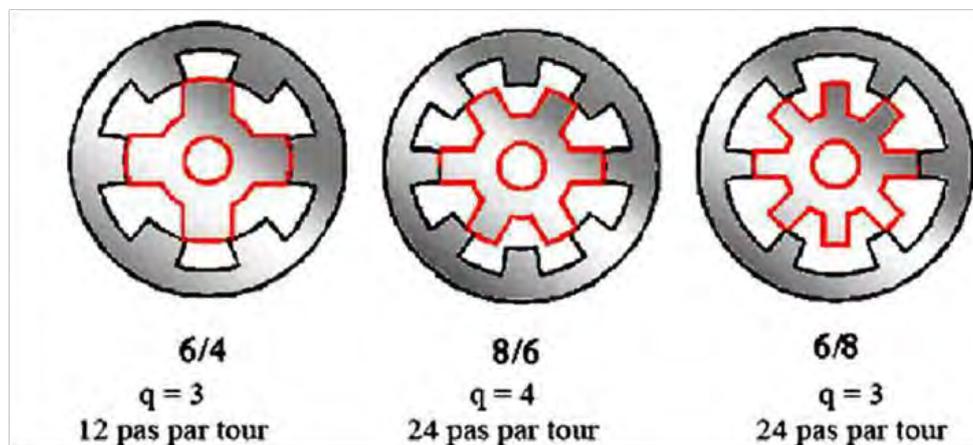


Figure -III.7- (a) MRV à 2 dents par phase.

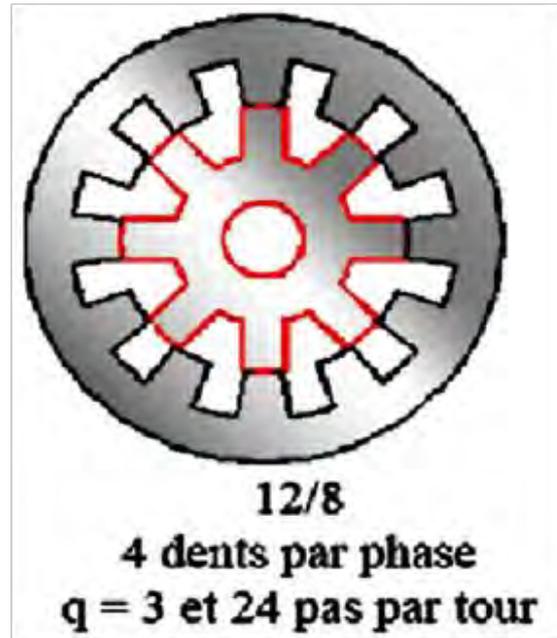


Figure -III.7- (b) MRV à 4 dents par phase.

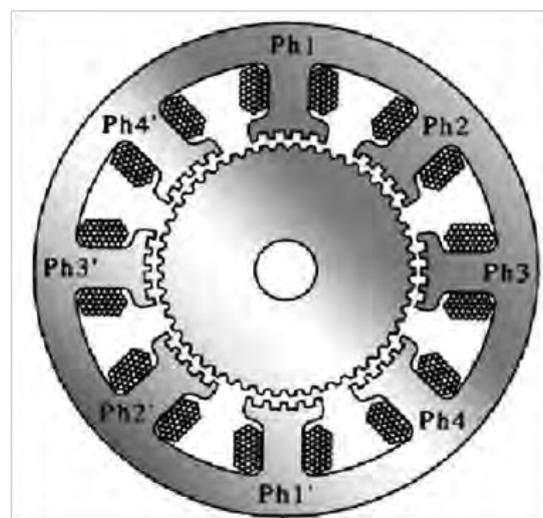


Figure -III.7- (c) MRV à pôles statoriques dentés.

III.3.2.2 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 équiréparties mais les nombres de dents statoriques et rotoriques sont légèrement différents (similaire à celui d'une machine synchrone

à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale (Figure -III.7- c). 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 asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines.

III.3.2.3 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 des aimants placés au rotor, la machine se rapprochant des machines synchrones à aimants enterrés (Interior Permanent Magnet) ; la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise des aimants placés au stator: on obtient alors une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée » (Figure -III.8-).

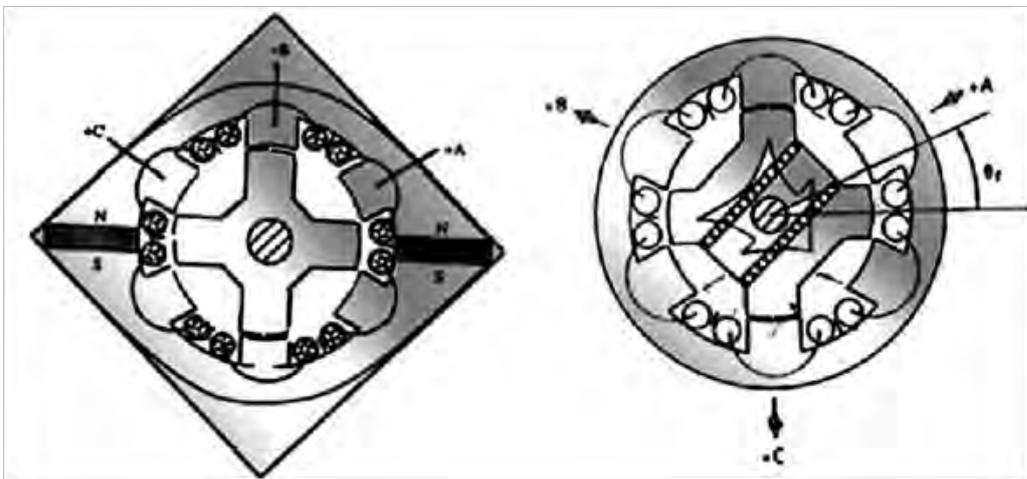


Figure -III.8- Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance.

La MRV de la Figure -III.9- met en œuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet vernier pour une alimentation sinusoïdale. Le grand nombre de dents de la machine à « plots aimantés » de la figure -III.10- rend cette structure intéressante pour les forts couples.

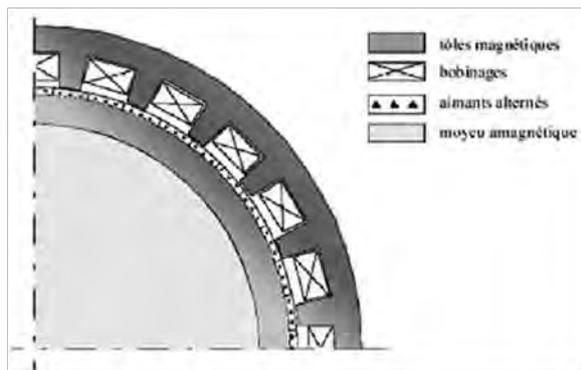


Figure -III.9- MRV hybride à effet Vernier.

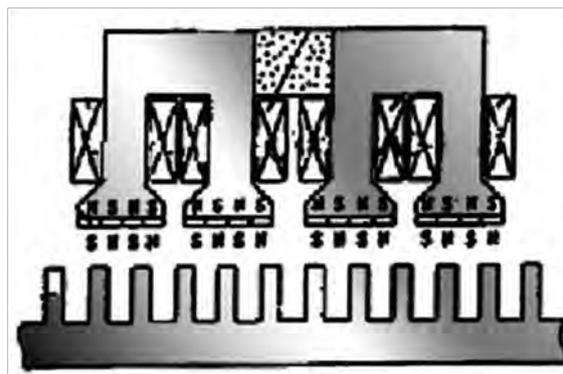


Figure -III.10- MRV à plots aimantés.

III.3.2.4 MV à flux axial

Cette machine a été appliquée à la propulsion marine au début des années 1970. Les caractéristiques sont similaires à celles de la machine synchrone à flux axial à savoir un fort couple massique mais avec des contraintes mécaniques importantes.

III.4 Caractéristiques principales de la MRV étudiée

Comme dans le chapitre précédent et à partir d'une puissance et vitesse données, où la valeur de la vitesse du rotor par rapport à la puissance est déterminée à partir d'une grande turbine éolienne existante étudiée précédemment, la Figure -II.3- représente la vitesse du rotor fonction de la vitesse du vent pour une éolienne de 2 MW [95, 96].

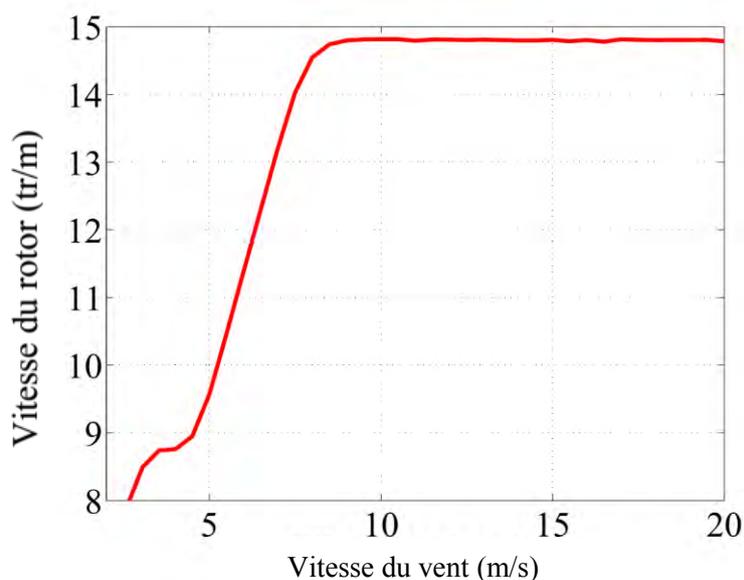


Figure -II.3- Vitesse du rotor vs. la vitesse du vent pour une éolienne de 2 MW.

Nous aspirons à effectuer un pré-dimensionnement d'une machine à reluctance variable (MRV) très lente et de grand diamètre (grand nombre de dents rotoriques) pour une éolienne à entraînement direct à partir d'une puissance et vitesse données selon la démarche synthétisée dans la Figure -III.11-. Pour cela, on propose d'étudier une MRVBV à entraînement direct dont les caractéristiques principales fixées sont résumées dans le Tableau III.1. Après quoi, on calculera directement les dimensions principales de la machine à partir de leur équation de puissance de dimensionnement (*Sizing Equation*) [78, 91] donnée par (III.11).

Tableau III.1. Paramètres de conception fixés pour la MRVBV.

<i>Paramètres de conception</i>	<i>Notation</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Puissance nominale	P_1	1.5	MW
Vitesse de rotation	Ω	1.57	rad/s
Nombre de phases	q	3	-
Fréquence	f	50	Hz
Facteur de puissance	$\cos \varphi$	0.98	-
Nombres de dents rotoriques	N_{dr}	200	-
Nombres de dents statoriques	N_{ds}	60	-
Nombre de pôles du stator/phase	N	20	-
Densité linéique de courant	A_s	60000	A/m
Induction dans la culasse	B	1.5	T
Rapport diamètre d'alésage (D) / longueur active de la machine (L)	R_{DL}	0.2	-

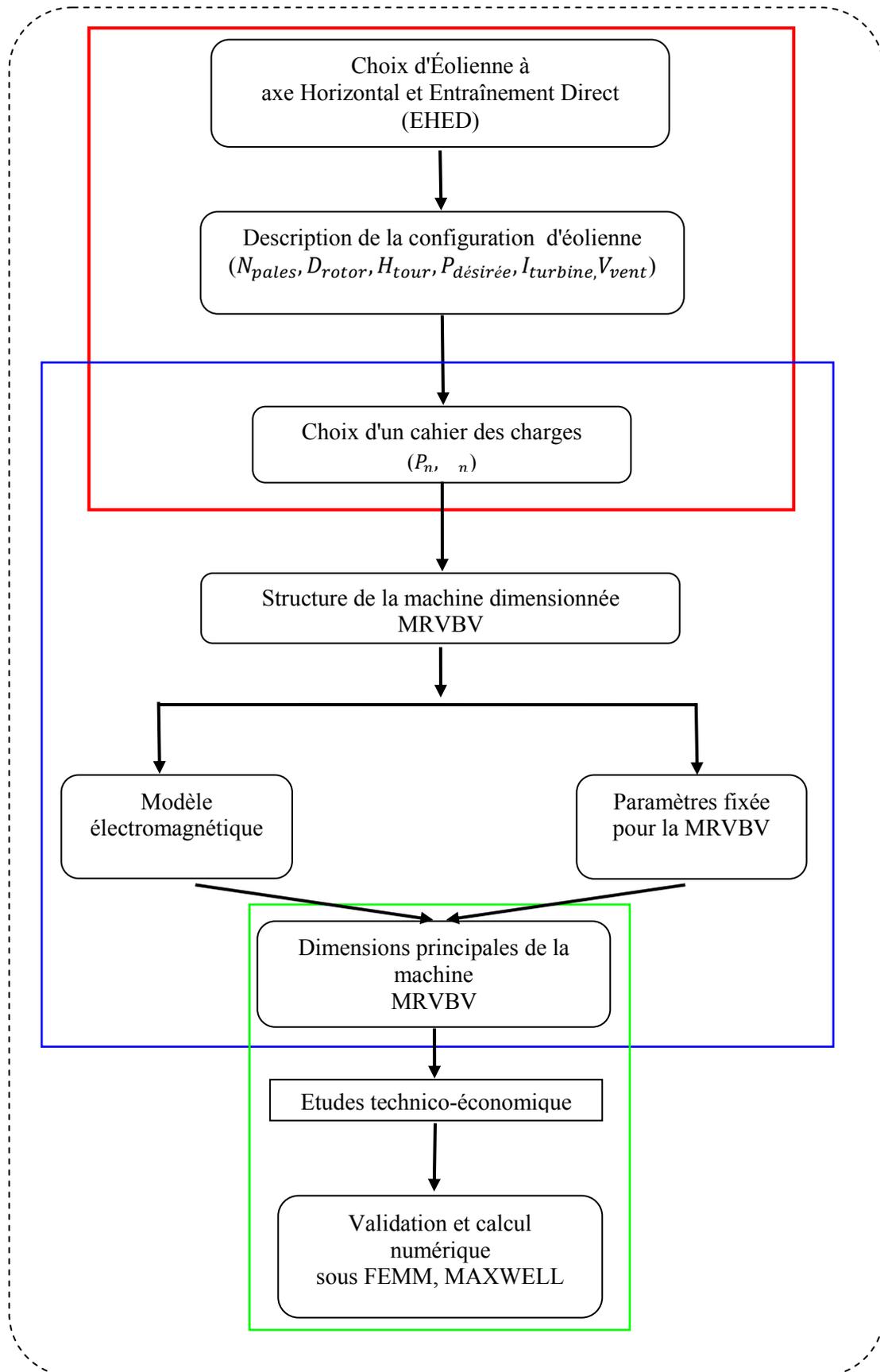


Figure -III.11- Organigramme des différentes étapes de notre démarche.

III.5 Dimensionnement analytique de la MRVBV

III.5.1 Équation de dimensionnement de la MRVBV

Malgré l'apparition et l'utilisation très ancienne de la machine à reluctance variable [1, 2], on trouve que son développement reste encore très limité, en particulier dans certains domaines. Les machines conventionnelles étant conçues à partir de l'équation de dimensionnement fournie par [97], un développement similaire est utilisé pour pré-dimensionner notre prototype de MRVBV. Cette équation générale de dimensionnement de la MRVBV que nous allons exposer ici est inspirée de l'excellent ouvrage de Krishnan [78].

La Figure -III.12- représente une MRV 6/4 qui demeure la structure la plus populaire des MRV ($N_s=6$ pôles statoriques/ $N_r=4$ pôles rotoriques). Les caractéristiques magnétiques flux/courant pour les deux positions extrêmes d'opposition (*unaligned*) et de conjonction (*aligned*) sont représentées dans la Figure -III.13-

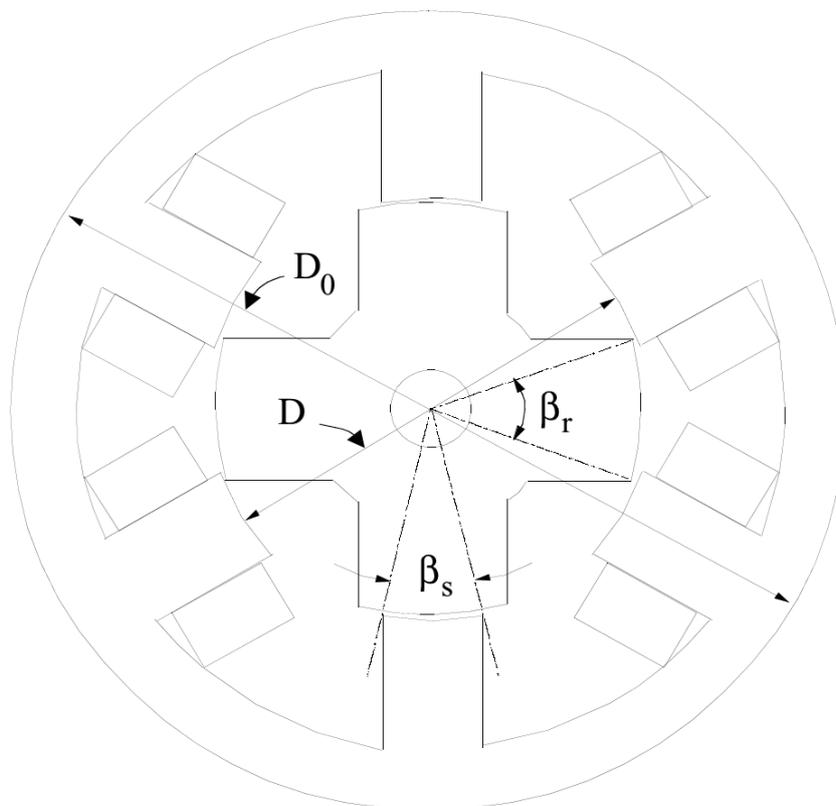


Figure -III.12- Représentation schématique 2D d'une MRV 6/4. [78]

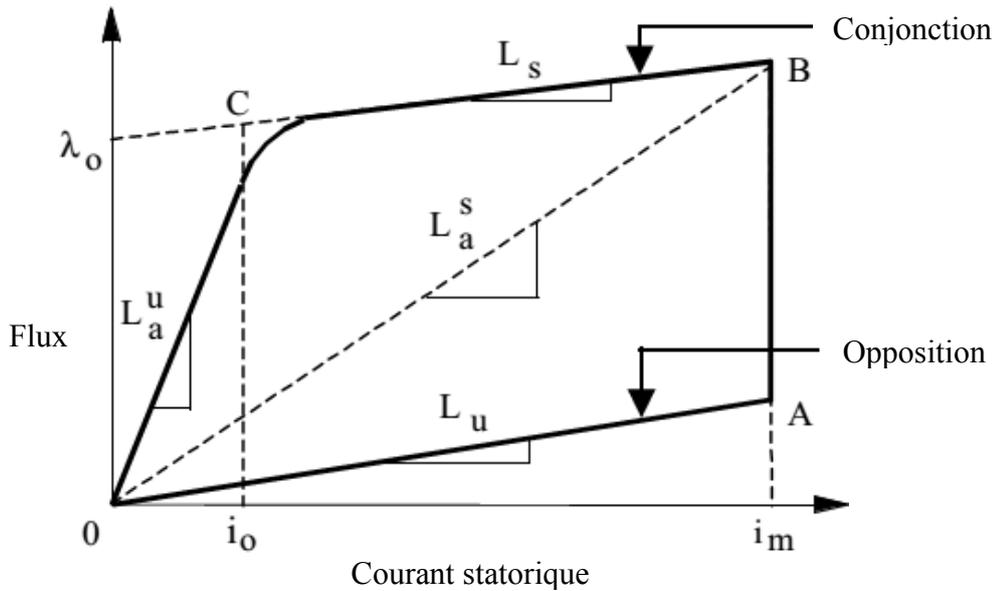


Figure -III.13- Caractéristiques magnétiques flux-courant de la MRV 6/4. [78]

L'énergie mécanique par cycle W (*per stroke energy*) de la MRV est proportionnelle à la surface (OABCO) comprise entre les 2 positions d'opposition et de conjonction. C'est une machine qui opère en zone saturée.

En négligeant la chute ohmique, la tension appliquée égale alors la variation de flux totalisé selon (III.11) :

$$V \approx \frac{d\lambda}{dt} = \frac{\lambda_a - \lambda_u}{t} = \frac{(L_a^s - L_u)}{t} i$$

(III.11)

Où:

L_a^s est l'inductance saturée de conjonction par phase (*aligned*)

L_u est l'inductance d'opposition par phase (*unaligned*)

t est le temps mis pour aller de la position d'opposition à l'autre de conjonction (III.12) :

$$t = \frac{\beta_s}{\omega_m} \left[\frac{\text{rad}}{\frac{\text{rad}}{\text{s}}} \right] \tag{III.12}$$

β_s est l'ouverture dentaire statorique en [rad]

w_m est la vitesse angulaire de rotor en [rad / s]

Posons :

$$\sigma_s = \left(\frac{L_a^s}{L_a^u} \right) \leq 1 \quad (\text{III.13})$$

$$\sigma_u = \left(\frac{L_a^u}{L_u} \right) \gg 1 \quad (\text{III.14})$$

L_a^u est l'inductance de conjonction mais non saturée.

En remplaçant (III.13) et (III.14) dans (III.11), la tension appliquée devient (III.15) :

$$V \cong \frac{w_m L_a^s i}{\beta_s} \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \quad (\text{III.15})$$

Avec:

$$L_a^s = N_s \phi_a = N_s B A_{sp} = N_s B D L \frac{\beta_s}{2} \quad (\text{III.16})$$

Où:

ϕ_a est le flux de conjonction

A_{sp} est la surface de dent statorique

D est le diamètre d'alésage

L est la longueur active

B est la densité de flux de pole statorique à la position de conjonction

N_s est le nombre de spires par phase

La densité linéique de courant est donnée par (III.17) :

$$A_L = \frac{2N_s i m}{\pi D} \quad (\text{III.17})$$

m est le nombre de phases conduisant simultanément,

Sachant que l'expression de puissance développée est (III.18) :

$$P_{MRVBV} = \eta k_d V_{im} \cos \varphi \quad (III.18)$$

Avec k_d est le rapport cyclique.

Finalement, en combinant (III.15), (III.16) et (III.17) avec (III.18), la puissance développée est devenue (III.19) :

$$P_{MRVBV} = \eta k_d \left(\frac{\pi^2}{120} \right) \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) A_L B D^2 L N_r \cos \varphi \quad (III.19)$$

Où N_r est la vitesse de rotor en $[tr/min]$

L'équation (III.19) peut être réarrangée pour être similaire à l'équation des machines classiques en D^2L (volume), soit (III.20) :

$$P_{MRVBV} = \eta k_d k_1 k_2 A_L B N_r \cos \varphi D^2 L \quad (III.20)$$

$$\text{Avec: } k_1 = \left(\frac{\pi^2}{120} \right)$$

$$k_2 = \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \in [0.65; 0.75], \text{ d'après Krishnan [78]}$$

D'après (III.20), l'équation de la puissance de sortie de la MRVBV est fonction de D^2L et en introduisant la vitesse angulaire Ω (rad/s), (III.20) peut être réorganisée selon (III.21) :

$$P_{MRVBV} = \eta k A_L B \Omega \cos \varphi D^2 L \quad (III.21)$$

En fixant les valeurs des coefficients à : $k_d = 1$, $k_1 = \pi^2/120$ et $k_2 = 0.75$ on déduit la valeur du coefficient global : $k = \frac{3\pi}{16}$

Finalement, (III.21) est l'équation générale de dimensionnement de la MRVBV (*SRMLS Sizing Equation*) fonction des principales dimensions de la machine ou du volume D^2L .

III.5.2 Modèle analytique

Le dimensionnement de la MRVBV passe par deux étapes principales comme pour la MSAPBV, à savoir :

- ❖ La première étape du dimensionnement consiste en un pré-dimensionnement sur la base d'un modèle analytique.
- ❖ La deuxième étape du dimensionnement fait appel aux modèles numériques.

Ce modèle de dimensionnement a été développé à la base d'une puissance et vitesse données. Dans un premier temps, on représente le modèle géométrique de la machine selon la Figure -III.14-

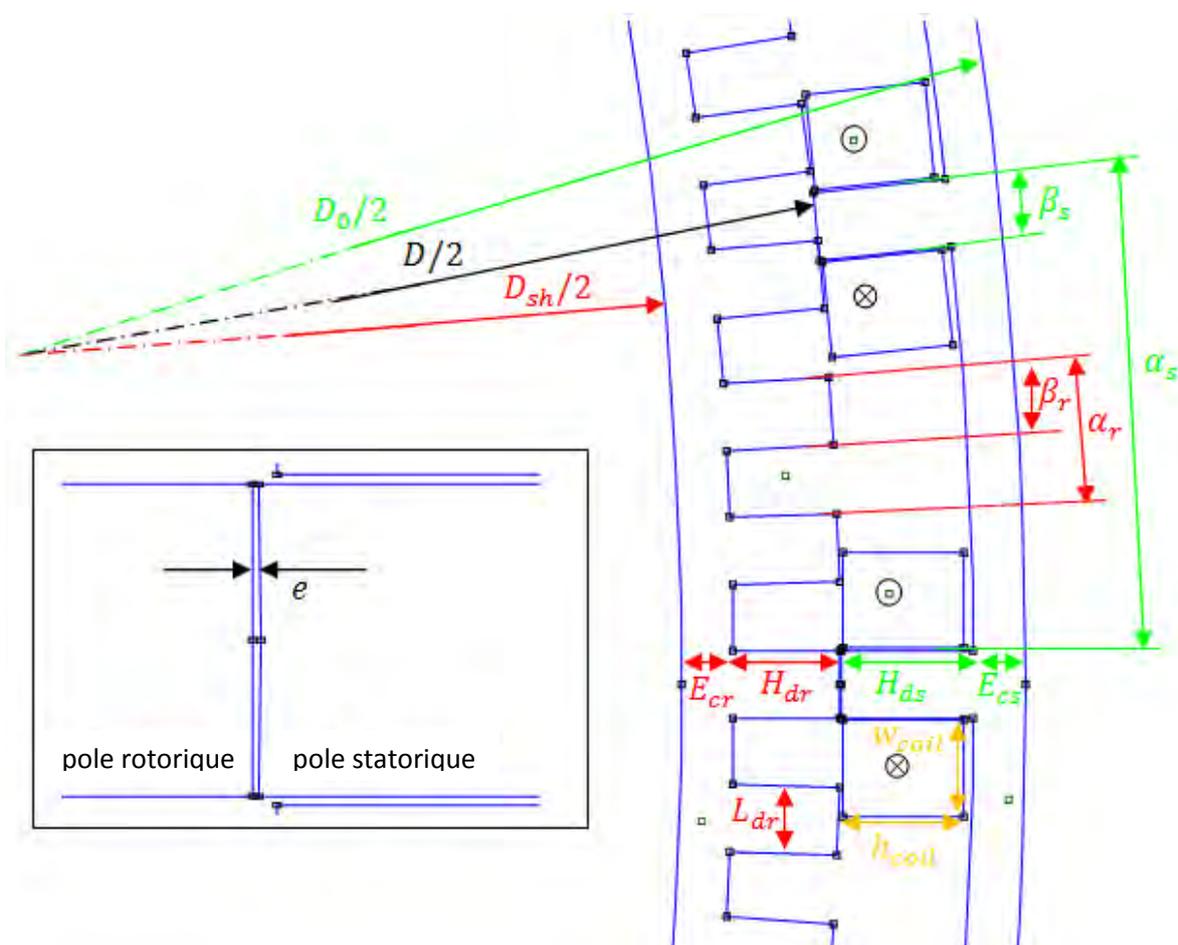


Figure -III.14- Principales dimensions du prototype de MRVBV.

1) On commence par le diamètre d'alésage D qui est fonction de la puissance de dimensionnement, de la densité du flux d'entrefer, de la densité linéique de courant, de la vitesse angulaire et du rapport diamètre d'alésage / longueur active, selon l'équation (III.22) :

$$D = [P_1 / kA_L B \Omega \cos \varphi R_{DL}]^{(1/3)} \quad (\text{III.22})$$

2) Puis la longueur active de la MRVBV L est calculée avec la relation suivante (III.23) :

$$L = \frac{D}{R_{RL}} \quad (\text{III.23})$$

3) Le diamètre extérieur statorique D_0 qui est fonction du diamètre d'alésage D par le ratio (III.24) dont la valeur typique pour les grandes machines est : $0.8 < k_d$:

$$D_0 = \frac{D}{k_d} \quad (\text{III.24})$$

4) Les largeurs des dents statorique L_{ds} et rotorique L_{dr} sont estimées par (III.25) et (III.26)

$$L_{ds} = D \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (\text{III.25})$$

$$L_{dr} = 2\left(\frac{D}{2} - e\right) \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) \quad (\text{III.26})$$

5) Epaisseurs des culasses statorique E_{cs} et rotorique E_{cr} calculée par (III.27) et (III.28) :

$$E_{cs} = k_c \left(\frac{L_{ds}}{2}\right) \quad (\text{III.27})$$

$$E_{cr} = k_c \left(\frac{L_{dr}}{2}\right) \quad (\text{III.28})$$

Où k_c est le coefficient des culasses dont la valeur typique est : {1;2}

6) Hauteurs des dents statorique H_{ds} et rotorique H_{dr} déterminées par (III.29) et (III.30) :

$$H_{ds} = \left(\frac{D_0}{2}\right) - \left(\left(\frac{D}{2}\right) + E_{cs}\right) \quad (\text{III.29})$$

$$H_{dr} = \left(\left(\frac{D}{2} \right) - \left(\left(\frac{D_{sh}}{2} \right) + e + E_{cr} \right) \right) \quad (\text{III.30})$$

7) Nombre de conducteurs/phase des bobinages statoriques N_t estimé selon (III.31) :

$$N_t = \frac{\pi A_s D}{(2 \text{Im})} \quad (\text{III.31})$$

8) Hauteur d'une bobine h_{bob} supposée égale à (III.32) :

$$h_{bob} = \frac{H_{ds}}{(k_b)} \quad (\text{III.32})$$

où k_b est le facteur de hauteur d'un pole statorique.

8) Largeur d'une bobine w_{bob} supposée égale à (III.33) :

$$w_{bob} = \frac{A_{bob}}{(h_{bob})} \quad (\text{III.33})$$

où A_{bob} est la surface d'une bobine selon (III.34) :

$$A_{bob} = \frac{S_c}{(k_f)} \quad (\text{III.34})$$

où k_f est le coefficient de remplissage.

et S_c est la surface bobinaire déterminée par (III.35) :

$$S_c = \frac{N_t}{(10)} S_{co} \quad (\text{III.35})$$

où S_{co} est la surface de conducteur qui est déterminée par (III.36) :

$$S_{co} = \frac{I}{J} \quad (\text{III.36})$$

Le diamètre de conducteur est supposé égal à (III.37) :

$$d_{co} = 2\sqrt{S_{co}/\pi}$$

(III.37)

9) La longueur moyenne d'une spire L_m est estimée par (III.38) :

$$L_m = 2L + \pi\left(\left(\frac{D}{2}\right)\beta_s + w_{bob}\right)$$

(III.38)

9) La résistance d'une phase statorique R_s est estimée par (III.39) :

$$R_s = \frac{\rho_{cui} N_t L_m}{S_{co}}$$

(III.39)

ρ_{cui} définit la résistivité de cuivre.

III.5.3 Calcul des volumes et masses des différentes parties de la MRVBV

Le modèle et les dimensions géométriques de la machine établis précédemment vont nous permettre d'estimer les volumes et les masses de chaque partie de la MRVBV (stator, rotor, cuivre) ainsi que le coût des parties actives, ce qui entre dans le cadre d'une étude technico-économique.

III.5.3.1 Volume et masse du stator

Le stator est décomposé en deux matériaux distincts : fer (culasse, dents) et cuivre ; donc le volume du stator est donné par (III.40) :

$$v_{ss} = v_{ss-acier} + v_{ss-cuivre}$$

(III.40)

où le volume de fer peut être décomposé en deux parties distinctes : culasse, dents (III.41) plus le cuivre qui est estimé par (III.44) :

$$v_{ss-fer} = v_{ss-culasse} + v_{ss-dents}$$

(III.41)

(III.42) donne le volume de culasse de fer et (III.43) donne le volume des dents :

$$v_{ss-culasse} = \frac{\pi}{4} L (D_0^2 - (2E_{cs})^2) \quad (III.42)$$

$$v_{ss-dents} = N_{ds} (LL_{ds} H_{ds}) \quad (III.43)$$

$$v_{ss-cuivre} = \pi \left(\frac{d_{co}}{2} \right)^2 L_{tc} \quad (III.44)$$

Finalement, la masse totale du stator s'exprime facilement en fonction de la masse volumique d'acier ρ'_{fer} et du cuivre ρ'_{cui} selon (III.45) :

$$M_{ss} = M_{ss-fer} + M_{ss-cuivre} \quad (III.45)$$

$$\text{Où: } \begin{cases} M_{ss-fer} = v_{ss-fer} \rho'_{fer} \\ M_{ss-cuivre} = v_{ss-cuivre} \rho'_{cui} \end{cases} \quad (III.46)$$

III.5.3.2 Volume et masse du rotor

Le rotor est composé d'un seul matériau fer (culasse, dents), d'où son volume donné par (III.47) :

$$v_{rr-fer} = v_{rr-culasse} + v_{rr-dents} \quad (III.47)$$

(III.48) donne le volume de culasse de fer rotorique et (III.39) le volume des dents rotoriques :

$$v_{rr-culasse} = \frac{\pi}{4} L (D_{sh} + (2E_{cr}))^2 - D_{sh}^2) \quad (III.48)$$

$$v_{rr-dents} = N_{dr} (LL_{dr} H_{dr}) \quad (III.49)$$

Finalement, la masse totale du rotor s'exprime facilement en fonction de la masse volumique de fer ρ'_{fer} selon (III.50) :

$$M_{rr} = V_{rr-fer} \rho'_{fer} \quad (III.50)$$

III.5.3.3 Masse totale de la MRVBV

La masse active de la MRVBV étant la somme des différents éléments actifs des masses statoriques et rotoriques, on la détermine à l'aide de l'équation (III.51) :

$$M_{MRVBV} = M_{ss} + M_{rr} \quad (\text{III.51})$$

III.5.4 Résultats Analytiques

Les résultats analytiques obtenus sous un code MATLAB à partir de l'équation principale de dimensionnement (D^2L) de notre MRVBV sont résumés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2. Principales dimensions géométriques du prototype de la MRVBV.

<i>Paramètres</i>	<i>Notation</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Diamètre d'alésage	D	4.5135	m
Longueur active	L	0.9027	m
Diamètre extérieur	D_0	4.7016	m
Diamètre de l'arbre	D_{sh}	4.3600	m
Entrefer	e	0.0004	m
Epaisseur de culasse statorique	E_{cs}	0.0266	m
Epaisseur de culasse rotorique	E_{cr}	0.0266	m
Largeur des dents statoriques	L_{ds}	0.0354	m
Largeur des dents rotoriques	L_{dr}	0.0354	m
Hauteur de dent statorique	H_{ds}	0.0674	m
Hauteur de dent rotorique	H_{dr}	0.0498	m

Alors que les paramètres de bobinage sont donnés dans le Tableau III.3.

Tableau III.3. Principales dimensions du bobinage stator.

<i>Paramètres</i>	<i>Notation</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Nombre de conducteurs/phase	N_t	4254	-
Surface de conducteur	S_{co}	$5.00e-6$	m^2
Diamètre de conducteur	d_{co}	0.0025	m
Surface de cuivre	S_c	0.0021	m^2
Surface de bobine	A_{bob}	0.0030	m^2
Hauteur de la bobine	h_{bob}	0.0613	m
Largeur de bobine	w_{bob}	0.0496	m
Longueur moyenne de spire	L_m	2.0725	m
Résistance de phase statorique	R_s	38.7903	ohm

Ce modèle permettra d'estimer les masses ainsi que le coût des parties actives (étude technico-économique) dont les résultats sont illustrés par les Figures -III.15-, -III.16- et -III.17-.

À partir de ces résultats qui sont basés sur l'équation principale de dimensionnement de la MRVBV où il est à noter que la réalisation d'une conception optimale reste très difficile à réaliser en raison du grand nombre de variables, de contraintes et de couplage des phénomènes physiques, nous avons pu développer l'équation de conception de la MRVBV; les résultats analytiques obtenus sont rassemblés dans les tableaux III.2. III.3. et III.4 suivants.

Les masses des parties actives de la MRVBV sont présentées dans le Tableau III.4. et la Figure -III.15-

Tableau III.4. Masse des parties actives de notre MRVBV.

Paramètres	Notation	Valeur (Kg)
Masse de culasse rotorique	$M_{rr-culasse}$	2.5270e+003
Masse des dents rotorique	$M_{rr-dents}$	2.4337e+003
Masse du rotor	M_{rr}	4.9607e+003
Masse de culasse statorique	$M_{ss-culasse}$	2.6936e+003
Masse des dents statoriques	$M_{ss-dents}$	989.5536
Masse du Fer stator	M_{ss-fer}	3.6831e+003
Masse de cuivre	$M_{ss-cuivre}$	1.4626e+003
Masse du stator	M_{ss}	5.1457e+003
Masse du Fer	M_{fer}	8.6438e+003
Masse totale de machine	M_{MRVBV}	1.0106e+004

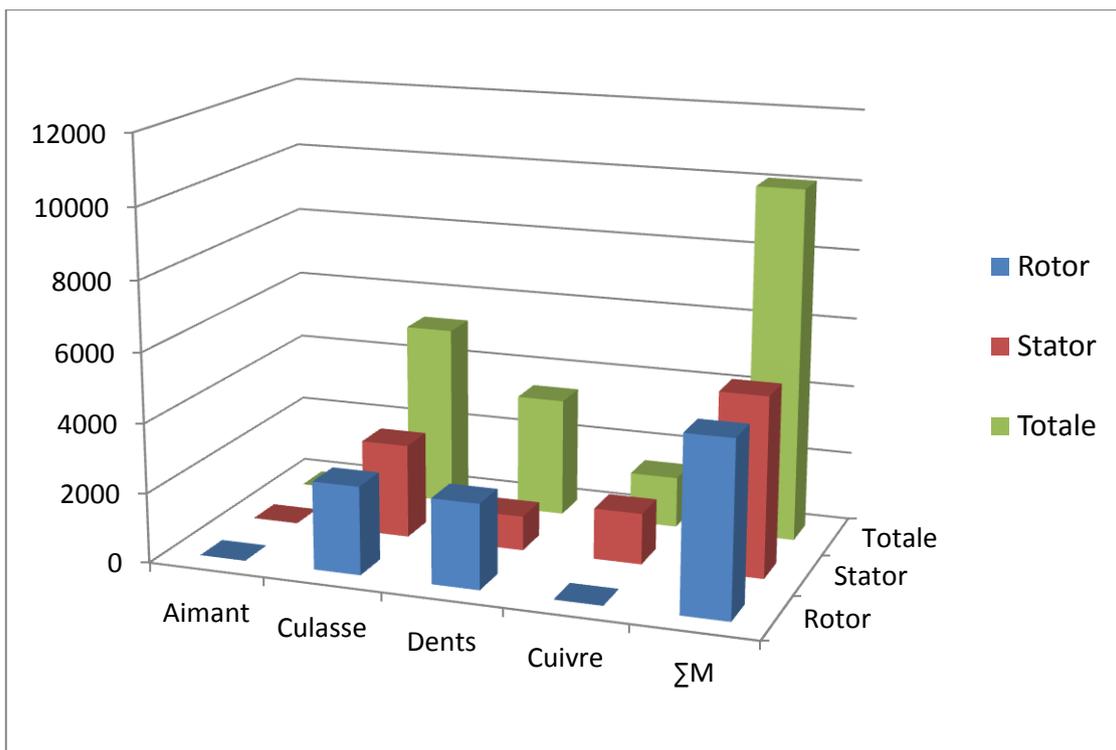


Figure -III.15- Masses de chaque partie du stator et du rotor (kg).

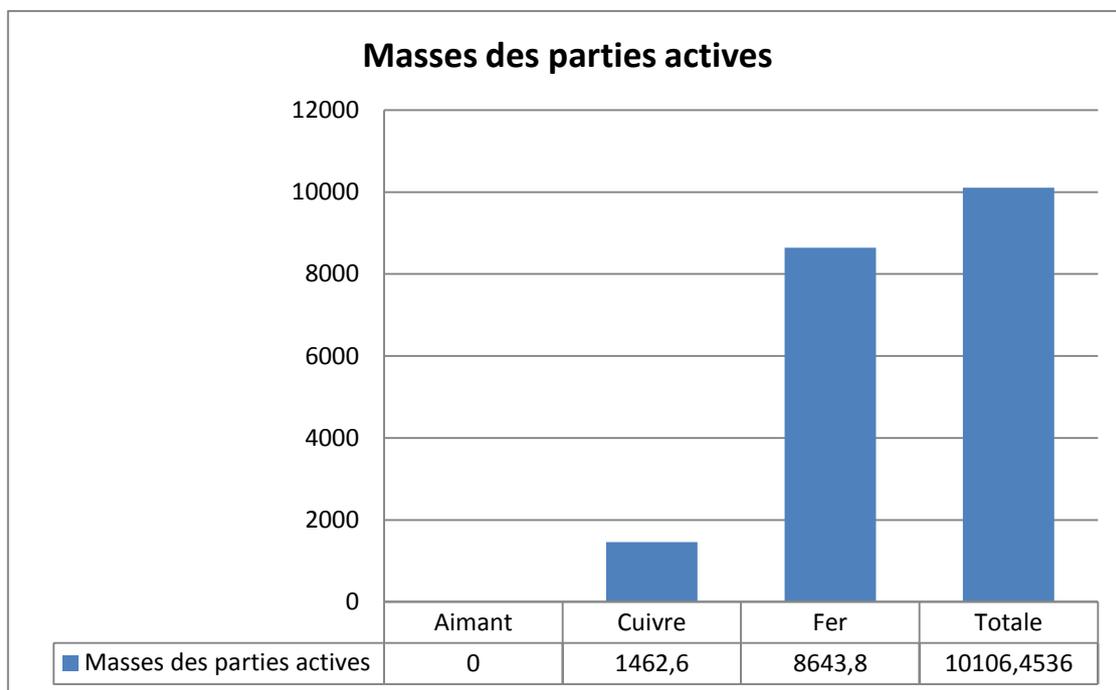


Figure -III.16- Masses des parties actives de la MRVBV (kg).

Pour l'estimation du coût des parties actives on utilise le Tableau II.8. pour représenter les couts sur la Figure -III.17- .

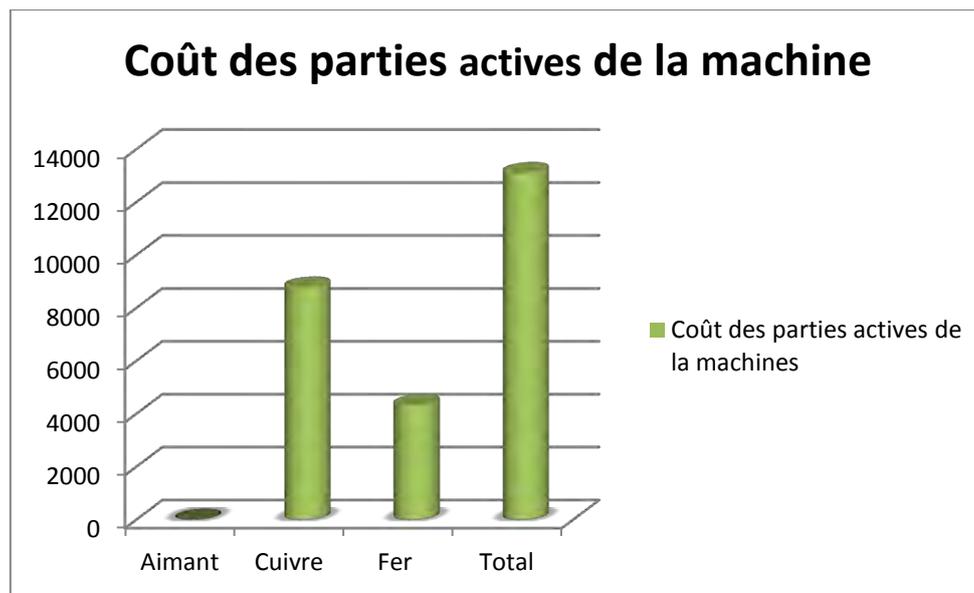


Figure -III.17- Coûts des parties actives de notre MRVBV (€).

Par une simple étude comparative entre la masse et le coût des parties actives de la MRVBV, on trouve que 85% de la masse totale de la machine représentent le fer alors que seulement 15% de la masse totale représentent le cuivre comme schématisé dans la Figure - III.18-. D'autre part, si on parle du coût, on trouve que 67% du coût total de la MRVBV est représenté par le cuivre alors que seulement 33% est représenté par le fer comme indiqué dans la Figure -III.19-.

Pour vérifier les résultats obtenus, nous allons utiliser la méthode des éléments finis pour une représentation de la machine en 2D ainsi que pour la validation de nos résultats analytiques à l'aide d'une méthode numérique.

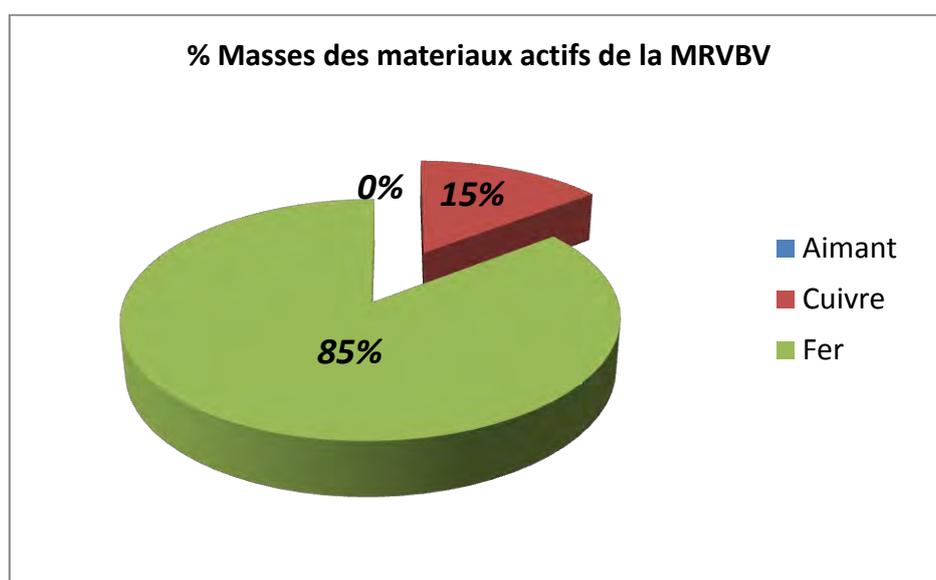


Figure -III.18- Masses des matériaux de la MRVBV.

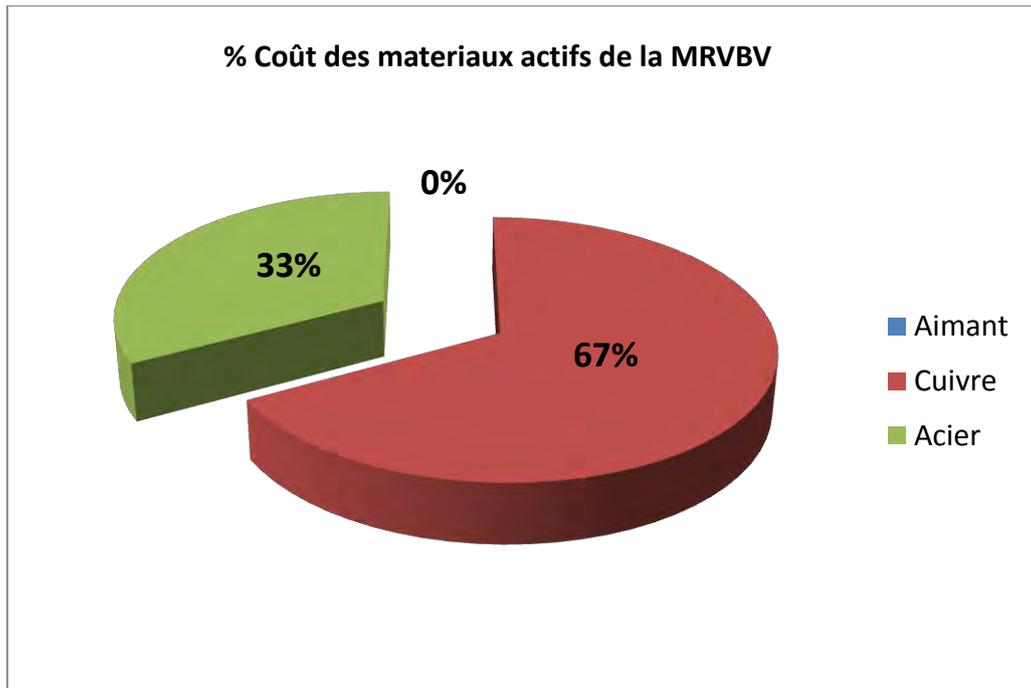


Figure -III.19- Coût des parties actives de la MRVBV.

III.6 Simulation numérique par éléments finis

Dans cette partie, nous allons présenter la deuxième étape du dimensionnement consacrée à la modélisation numérique par la méthode des éléments finis afin de valider les résultats obtenus par l'approche analytique.

III.6.1 Modèle de la MRVBV étudiée

Les premières simulations ont été réalisées en 2D par le logiciel de calcul par éléments finis FEMM. Après quoi, nous avons introduit toutes les dimensions obtenues par nos calculs analytiques, ce qui nous a permis de voir la machine pour la première fois. Dans toutes les simulations réalisées, on n'a modélisé, pour des raisons de temps de calcul et d'efficacité du processus de conception, qu'une partie de la machine tenant compte des symétries existantes. La géométrie de la MRVBV en 2D est représentée dans la Figure -III.20-.

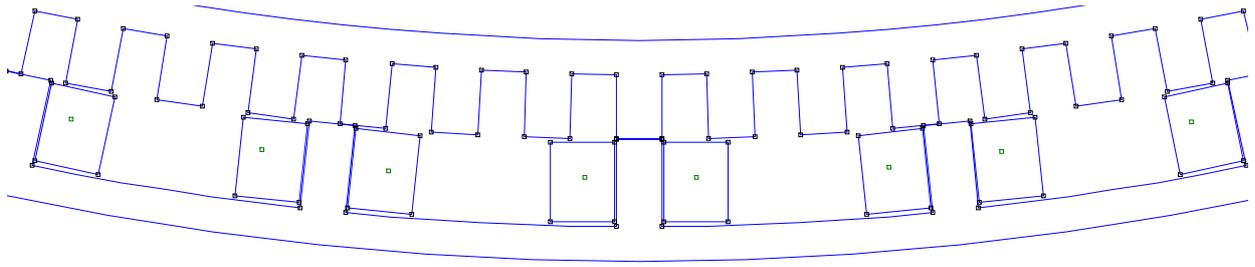


Figure -III.20- Structures de la MRVBV en 2D.

Le découpage du domaine en élément finis est une étape essentielle car la précision des calculs dépend de sa finesse. Nous avons utilisé un maillage de 305258 éléments comme illustré dans la Figure -III.21-.

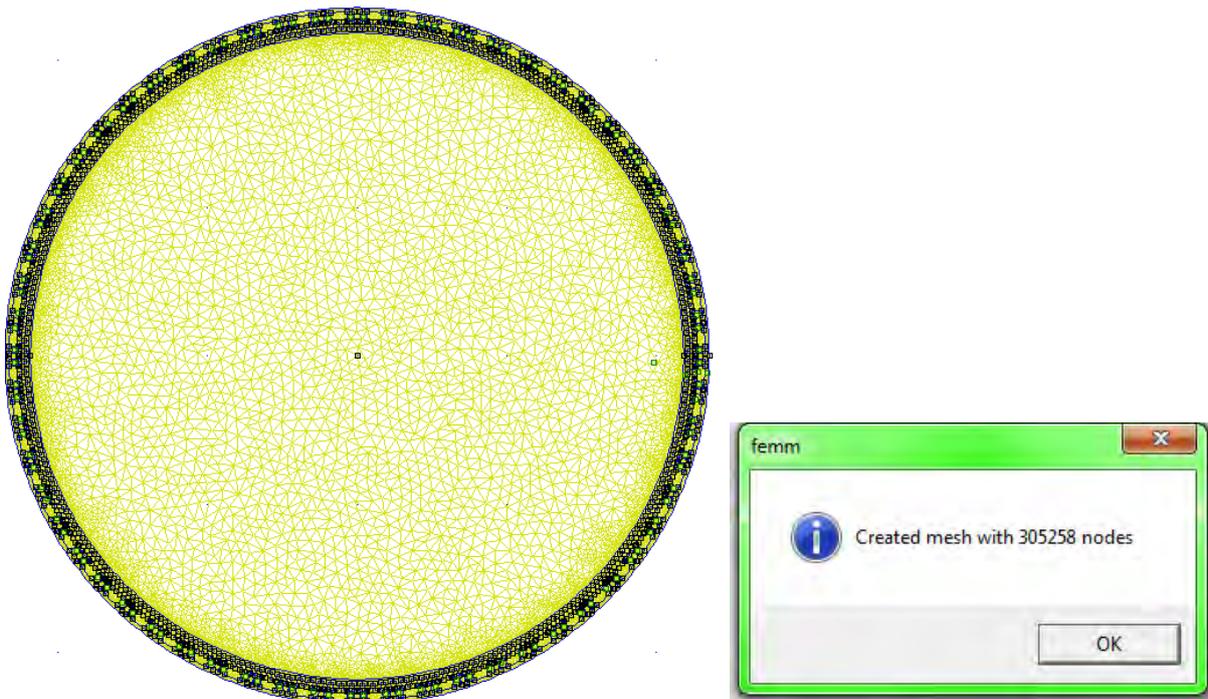


Figure - III.21- Maillage du domaine d'étude en 2D.

III.6.2 Résultats graphiques

Après le maillage de notre système et spécification des conditions aux limites sur les frontières du domaine d'étude, nous avons représenté les lignes de champ dans les deux positions extrêmes (conjonction et opposition) selon figure -III.22- et figure -III.23- et de densité de flux selon Figure -III.24-, et Figure -III.25- dans différents régions de la MRVBV.

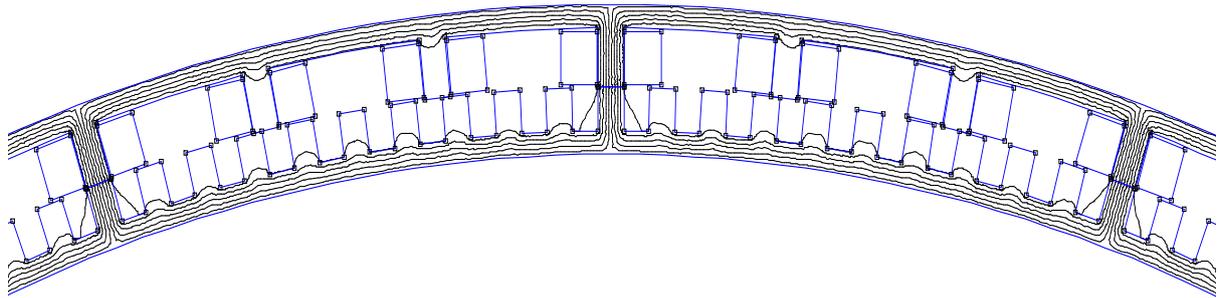


Figure - III.22- Distribution des lignes de champ magnétique.

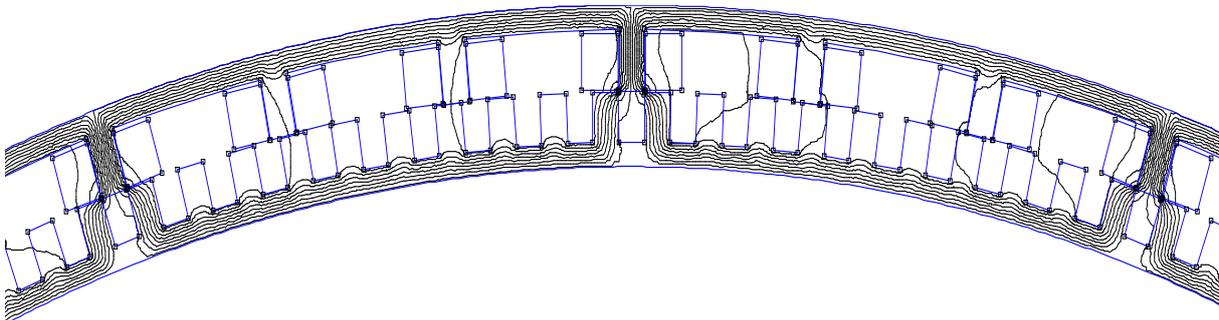


Figure - III.23- Distribution des lignes de champ magnétique en opposition.

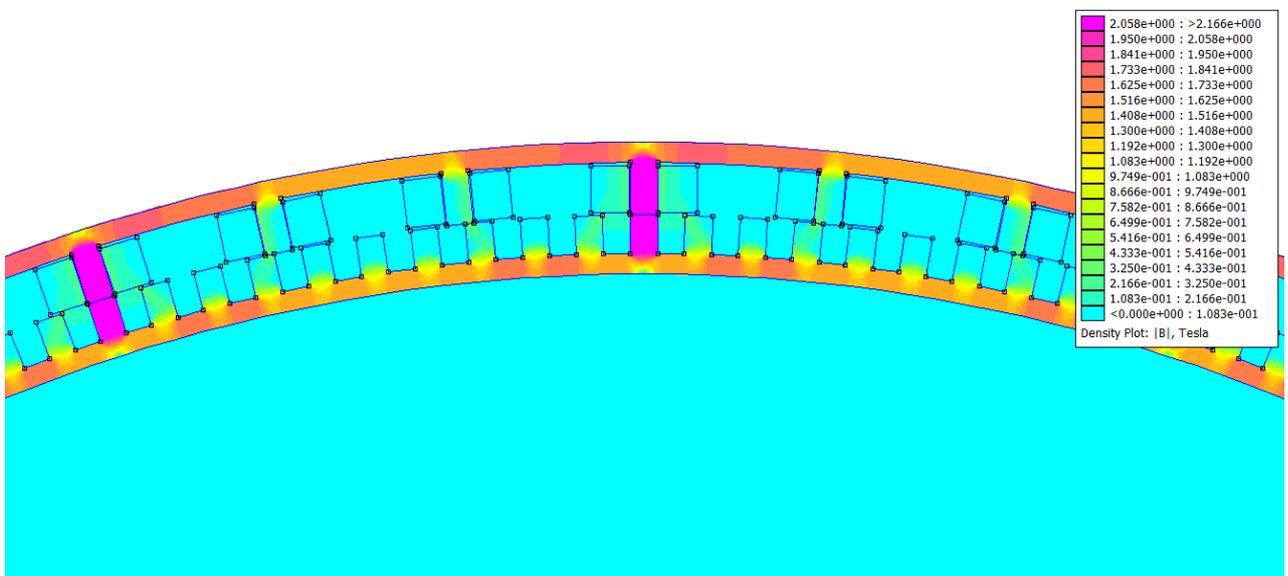


Figure - III.24- Distribution de la densité de flux magnétique.

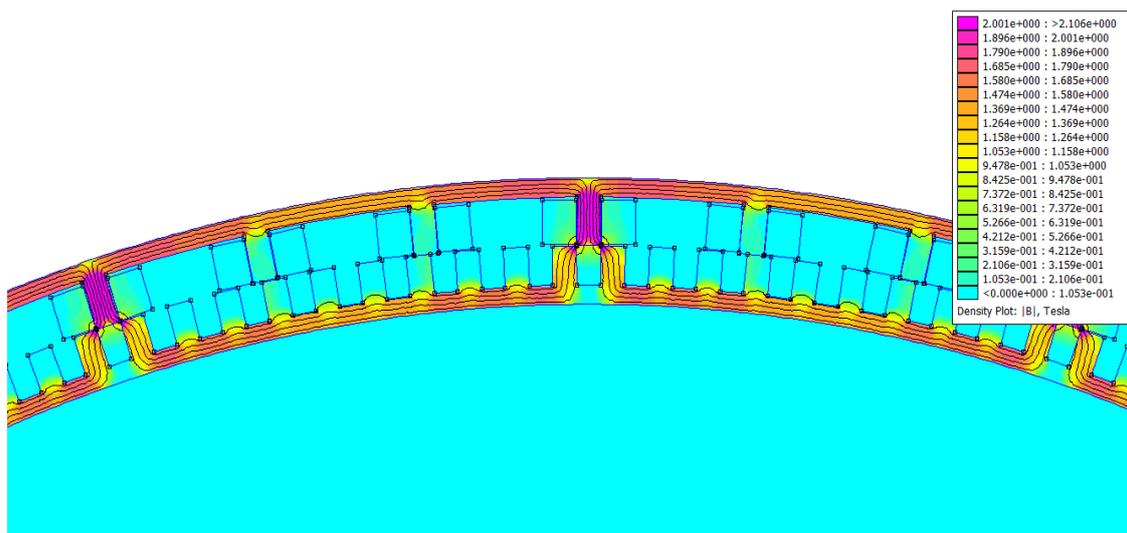


Figure - III.25- Distribution de la densité de flux magnétique en opposition.

A partir des simulations précédentes, nous avons pu effectuer une représentation de notre prototype de MRVBV en 2D avec des cartographies qui corrigent la démarche analytique en positions de conjonction et d'opposition.

Remarquons qu'environ 15% de la masse de la MRVPBV est la masse de cuivre alors que 67% du prix de la MSAPBV est le coût de cuivre selon les Figures -III.18- et -III.19-.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, et à partir d'une puissance et vitesse données ($1,5\text{ MW}$ et $1,5\text{ rad/s}$) dans le domaine d'énergie renouvelable type éolienne, une machine à reluctance variable à faible vitesse et grand diamètre à entraînement direct (sans multiplicateur de vitesse) a été dimensionnée moyennant l'équation de dimensionnement des machines électriques (*sizing equations*). Nous avons présenté les modèles analytique et numérique par éléments finis de dimensionnement et de validation d'un prototype de MRVPBV mais nous n'avons pas réalisé une conception optimale car c'est un travail difficile principalement en raison du grand nombre de variables, de certaines contraintes liées à un problème non-linéaire et fortement couplé (problème multiphysique). Toutefois, nous avons pu développer les équations de dimensionnement du prototype et obtenus des résultats analytiques avec une étude technico-économique. La méthode des éléments finis a permis de vérifier les résultats analytiques obtenus et de prouver l'efficacité de la démarche proposée.

Performances Comparées de MSAPBV et MRVBV

CHAPITRE IV:

Performances Comparées de MSAPBV et MRVBV

IV.1 Introduction 85

IV.2 Equations de dimensionnement 85

IV.3 Comparaison des dimensions 86

IV.4 Comparaison des volumes et masses 88

IV.5 Comparaison des coûts 89

IV.6 Performances comparées 90

IV.7 Conclusion 91

IV.1 Introduction

Dans le domaine de l'énergie éolienne et plus particulièrement à entraînement direct (sans multiplicateur de vitesse), les dimensions externes donc le volume (D^2L) ainsi que les caractéristiques des matériaux de construction du générateur électrique sont un critère très important (puissance massique, coût, ...) dans le choix d'un système éolien. Dans ce quatrième chapitre, nous allons effectuer une étude comparative des équations de dimensionnement ainsi que des volumes, masses et coûts des deux types d'aérogénérateurs (MSAPBV et MRVBV) étudiés dans les chapitres précédents, sachant que toute comparaison demeure une tâche ardue et compliquée.

IV.2 Équations de dimensionnement

Sur la base de nos modèles analytiques précédents, nous avons pu tirer des conclusions préliminaires sur nos deux machines, à partir des équations générales de dimensionnements de la MSAPBV et de la MRVBV, (II.8) et (III.21) respectivement, en fonction des principales dimensions ou du volume D^2L :

$$P_{MSAPBV} = \eta_1 \left(\frac{\pi^2}{8} \right) k_{w1} \hat{B}_{g1} \hat{A}_1 D^2 L \Omega \cos \varphi_1 \quad (\text{II.8})$$

$$P_{MRVBV} = \eta k A_L B \Omega \cos \varphi D^2 L \quad (\text{III.21})$$

Jusqu'à présent, nous n'avons effectué qu'une étude analytique basique des équations de dimensionnement des deux machines, fondée sur le calcul de volume, donc de la masse et par conséquent du coût. Des deux équations précédentes, nous pouvons déduire le ratio des deux volumes, à savoir :

$$\frac{(D^2L)_{MSAPBV}}{(D^2L)_{MRVBV}} = \frac{k [\eta B A_L \Omega \cos \varphi]}{\left(\frac{\pi^2}{8} \right) k_{w1} \left[\eta_1 \hat{B}_{g1} \hat{A}_1 \Omega \cos \varphi_1 \right]} \quad (\text{IV.1})$$

A présent, nous allons étudier le ratio (IV.1) en supposant que les deux machines ont les mêmes puissances, les mêmes densités linéiques de courants A , les mêmes inductions d'entrefer B et la même vitesse de rotation Ω , d'où :

$$\frac{(D^2L)_{MSAPBV}}{(D^2L)_{MRVBV}} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \left(\frac{k}{k_{w1}}\right) \frac{[\eta \cos \varphi]}{[\eta_1 \cos \varphi_1]} \quad (IV.2)$$

À partir de l'équation (IV.2), nous pouvons dire que la MSAPBV a un volume moindre que celui de la MRVBV pour des puissances et vitesses de rotation identiques, donc un éventuel avantage en termes de poids et de coût que nous allons étudier dans ce qui suivra.

IV.3 Comparaison des dimensions analytiques

Le Tableau IV.1 donne une indication des comparaisons des dimensions générales relatives aux deux machines MSAPBV et MRVBV où le modèle mathématique est basé sur les paramètres géométriques de chaque topologie.

Tableau IV.1. Comparaisons des dimensions principales des deux machines

Type de la machine	<i>MSAPBV</i>	<i>MRVBV</i>
Diamètre d'alésage (<i>m</i>)	5.5616	4.5135
Longueur active (<i>m</i>)	0.5562	0.9027
Entrefer (<i>m</i>)	0.0047	0.0004
Epaisseur de culasse (<i>m</i>)	0.0135	0.0266
Epaisseur de l'aimant (<i>m</i>)	0.0139	-
Largeur d'aimant (<i>m</i>)	0.0298	-
Longueur moyenne d'une spire de cuivre (<i>m</i>)	1.141	2.0725

La valeur de l'entrefer est minimisée tout en respectant certaines contraintes mécaniques. Toutes ces valeurs entrent dans le volume des deux machines selon l'équation (IV.2).

Ci-dessous une représentation 3D des géométries des deux machines selon les Figures IV.1 et IV.2.

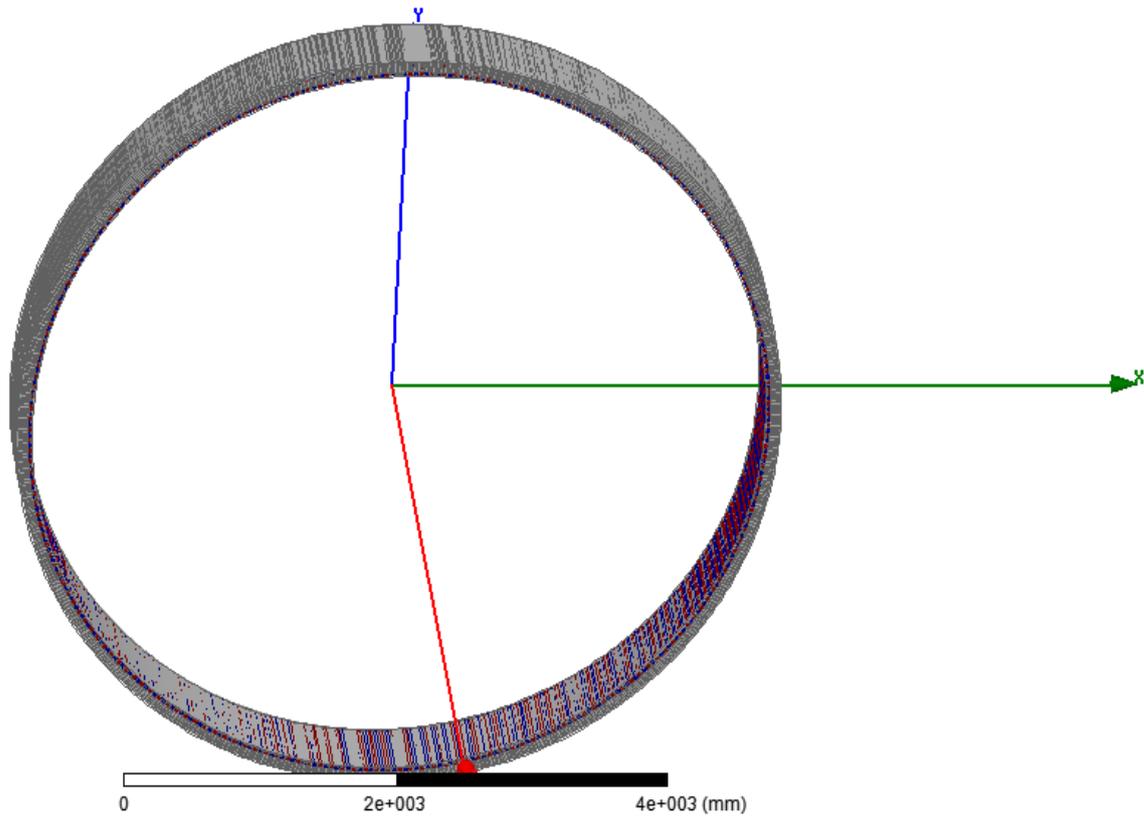


Figure -IV.1- Vue complète de la MSAPBV en 3D.

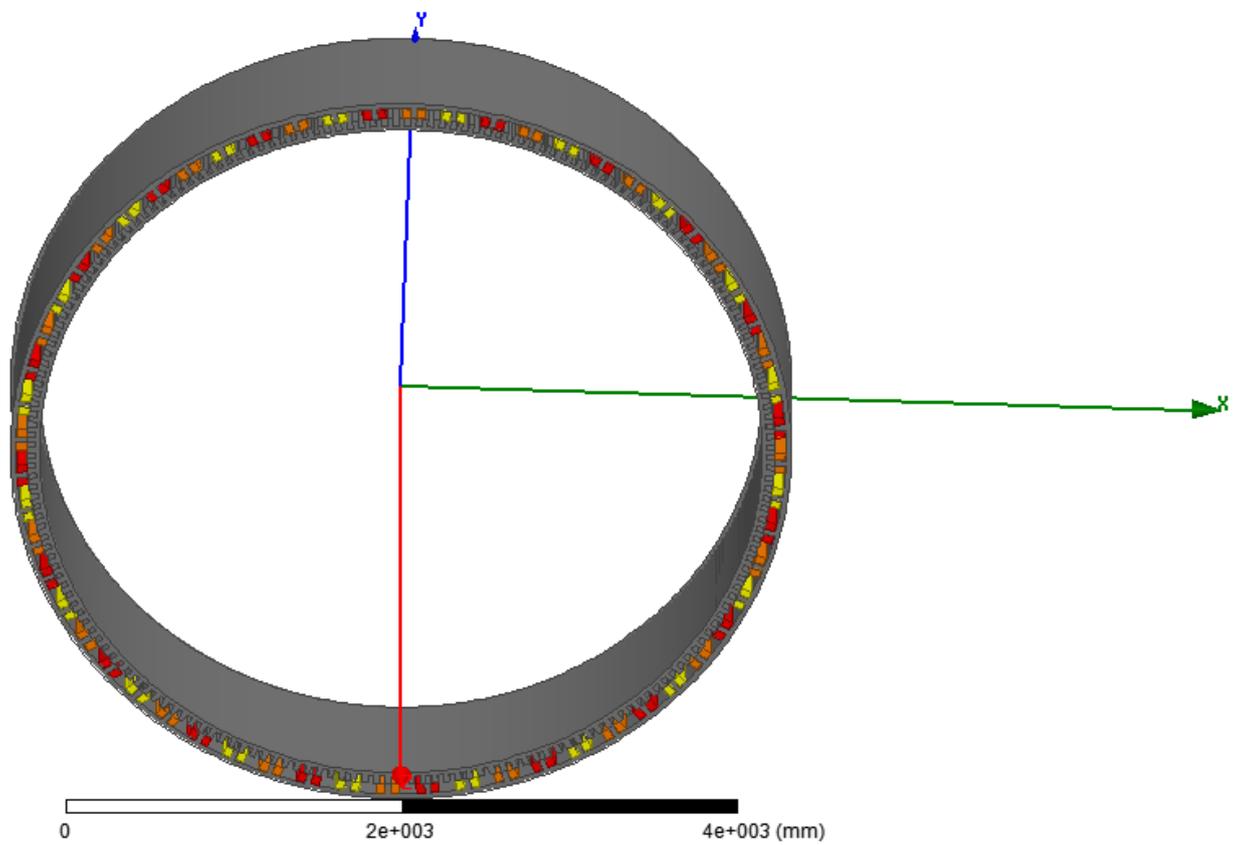


Figure -IV.2- Vue complète de la MRVBV en 3D.

IV.4 Comparaison des volumes et masses

Aujourd'hui, avec les progrès dans le domaine des énergies renouvelables et surtout dans les systèmes éolien à attaque directe, les générateurs ont de grandes dimensions (diamètres), ce qui conduit à des problèmes de transport, d'installation et de prix.

Le Tableau IV.2. et la Figure -IV.3- donnent une indication générale en termes de comparaisons des volumes et poids pour les deux machines dimensionnées MSAPBV et MRVBV.

Tableau IV.2. Comparaisons des volumes et poids des deux machines

Type de la machine		<i>MSAPBV</i>	<i>MRVBV</i>
Fer	<i>Volume</i>	0.5900	1.1311
	<i>Poids (kg)</i>	4.5969e+003	8.6438e+003
Aimant	<i>Volume</i>	0.0940	-
	<i>Poids (kg)</i>	657.4534	-
Cuivre	<i>Volume</i>	0.1540	0.1322
	<i>Poids (kg)</i>	1.7114e+003	1.4626e+003
Total	<i>Volume</i>	14.33	15.67
	<i>Poids (kg)</i>	6.9319e+003	1.0106e+004

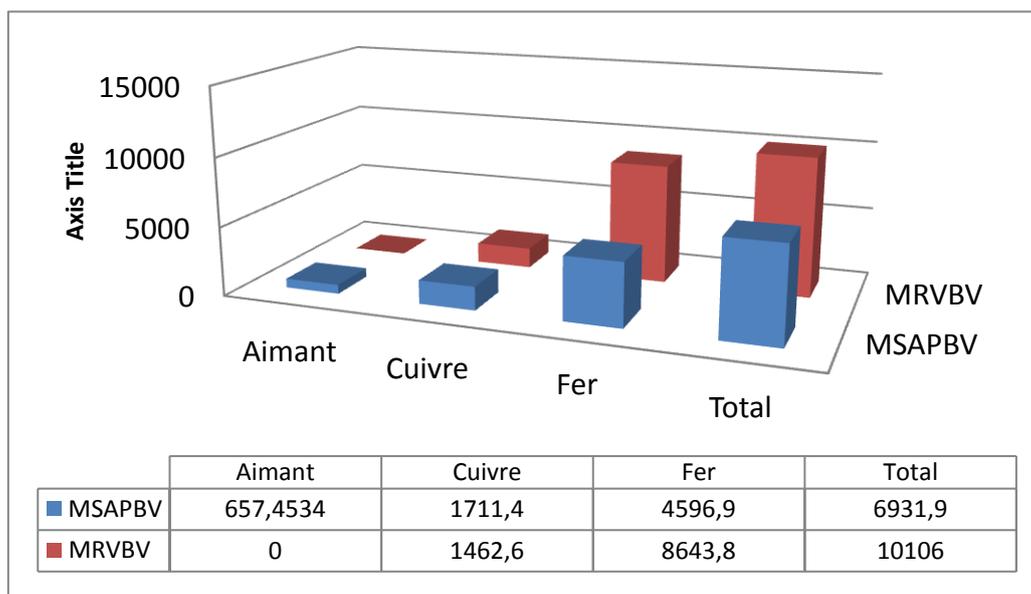


Figure -IV.3- Comparaison des poids des deux machines (kg).

La Figure -IV.3- montre que le poids de la MRVBV est supérieur à celui de la MSAPBV, mais c'est un plus pour les machines qui tournent avec de faibles vitesses ou dans un nombre d'applications où le poids est un critère important.

IV.5 Comparaison des coûts

Dans tous les domaines d'applications, et pour une puissance donnée, la topologie choisie d'une machine électrique devrait avoir un coût réduit de la matière active ; cependant, comme il est assez difficile d'obtenir le coût d'une machine, on se contente souvent d'une estimation à partir d'hypothèses :

- seules les parties actives sont prises en compte dans les coûts (les coûts de matériaux inactifs ne sont donc pas inclus) ;
- les matériaux fer, aimant et cuivre ont des coûts déjà spécifiés dans le Tableaux II.8.

Le Tableau IV.3. et la Figure -IV.4- donnent une indication générale des comparaisons des coûts pour les deux machines dimensionnées MSAPBV et MRVBV.

Tableau IV.3. Comparaisons des coûts des deux machines

Type de la machine	<i>MSAPBV</i>	<i>MRVBV</i>
Fer	2298.4988	4321.9
Aimant	57198.4458	-
Cuivre	10268.4	8775.6
Total	69765.3445	13097.5

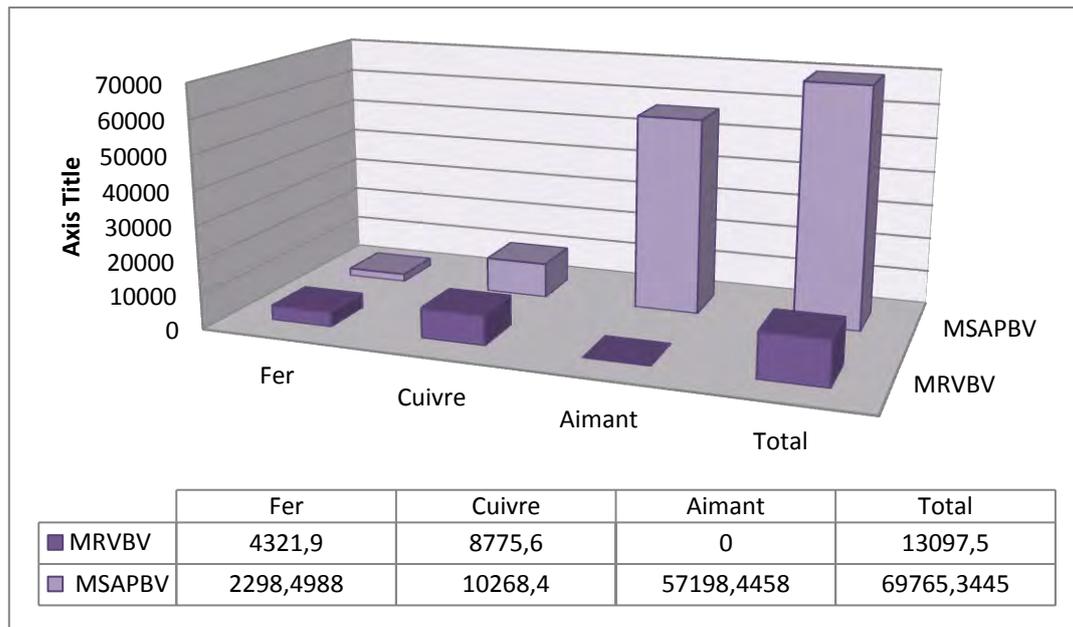


Figure -IV.4- Comparaison des coûts des deux machines.

La Figure -IV.4- montre qu'il y a une grande différence entre les prix des deux prototypes : la MSAPBV est 4 à 5 fois plus coûteuse que la MRVBV, malgré que le prix du Fer de la MRVBV est le double de celui de la MSAPBV. Mais le problème se situe surtout au niveau du coût de l'aimant (cf. Tableau II.8.) qui représente 82% du coût total de la MSAPBV, contrairement à la MRVBV qui en est dépourvue !

IV.6 Performances comparées

La comparaison de différentes topologies de machines électriques est une tâche assez compliquée. Le calcul analytique de la *densité de couple* et du ratio *coût/couple* des parties actives (Tableau IV.4) est estimé par un modèle mathématique basé sur les paramètres géométriques pour les deux topologies de machines étudiées (MSAPBV et MRVBV).

La méthode de comparaison des différentes topologies de machines est inspirée des données sur les machines tirées de la littérature. Notre étude comparative des deux topologies de machines est basée sur des modèles analytiques. Les critères utilisés pour la comparaison sont la « densité de couple » et le ratio « coût/couple », ces deux critères sont identifiés comme étant essentiels pour l'intégration des générateurs à entraînement direct dans les éoliennes.

Tableau IV.4. Comparaison de MSAPBV avec MRVBV pour une vitesse identique.

Machines	Vitesse (rad/s)	Densité de couple (kNm/m³)	Cout/couple (€/kNm)
MSAPBV	1.5	69.78	69.76
MRVBV	1.5	63.80	13.09

Sur la base des résultats précédents, la MSAPBV a des performances supérieures à celles de la MRVBV. En outre, il est possible de construire une MRVBV avec une densité de couple proche ou comparable avec un rapport de cout/couple meilleur que celui de la MSAPBV.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude comparative des équations de dimensionnement, des volumes, masses et coûts des deux différentes topologies d'aérogénérateurs (*MSAPBV* et *MRVBV*) étudiés dans les chapitres précédents. Une comparaison est effectuée où seules les parties actives sont considérées. Sur la base de nos modèles analytiques précédents, nous avons pu tirer des conclusions préliminaires, à savoir : intrinsèquement, la MSAPBV possède des performances supérieures mais la MRVBV peut avoir des performances comparables avec la MSAPBV si les critères utilisés pour la comparaison sont la *densité de couple* et le rapport *cout/couple* (Tableau IV.4) qui sont identifiés comme étant essentiels pour l'intégration des générateurs à entraînement direct dans les éoliennes qui ont de grands diamètres, ce qui conduit à des problèmes de transport, d'installation, de maintenance,

Conclusion Générale

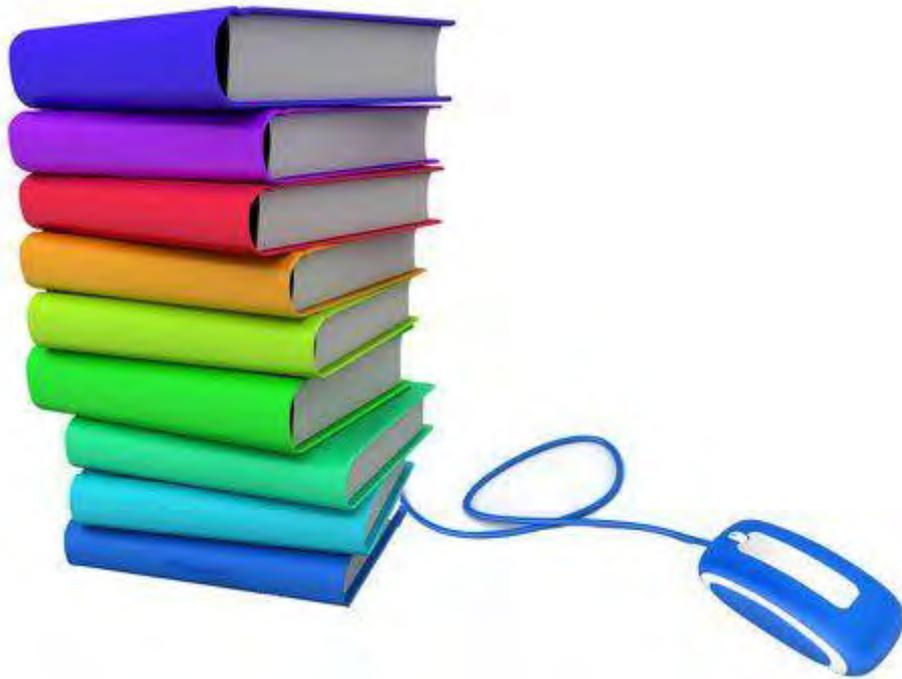
Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse sont axés sur l'étude de générateurs innovants adaptés à la conversion d'énergie éolienne sans multiplicateur de vitesse (attaque directe ou direct-drive). A cet effet, nous avons réalisé une étude comparative entre différents types de générateurs potentiels candidats pour la conversion d'énergie éolienne. Cette étude est fondée sur un examen exhaustif de l'état de l'art ainsi que sur une comparaison des performances de trois grands générateurs classiques utilisés dans un système éolien, à savoir: Générateur Asynchrone Double Alimentation (GADA); Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE); Générateur Synchrone à Aimant Permanent (GSAP); Générateur à Réductance Variable (GRV).

Après avoir choisi deux potentiels candidats de générateurs éoliens, GSAP et GRV, de grande puissance ($1,5 MW$) entraînées à faible vitesse ($1,55 rad/s$) et sans réducteur (entraînement direct) pour une turbine éolienne tripale à axe horizontal du constructeur NREL, nous les avons dimensionnés analytiquement. La méthodologie adoptée ici a permis d'établir un modèle mathématique analytique de dimensionnement géométrique à la base de l'équation de dimensionnement des machines électriques (*sizing equations*) qui a été ensuite utilisée pour une simulation du fonctionnement de la machine selon un modèle numérique par la méthode des éléments finis. L'analyse des résultats obtenus grâce à un couplage judicieux et interactif des deux logiciels MATLAB et FEMM a permis de valider notre modèle analytique.

À la fin, nous avons effectué une analyse comparative des équations de dimensionnement, des volumes, masses et couts des deux différentes topologies d'aérogénérateurs (*MSAPBV* et *MRVBV*). Sur la base de nos modèles analytiques, nous avons tiré un certain nombre de conclusions sur nos deux machines où la *MSAPBV* présente des performances supérieures mais où la *MRVBV* peut avoir des performances comparables avec la *MSAPBV* si les critères utilisés pour la comparaison sont la *densité de couple* et le rapport *cout/couple* qui sont identifiés comme étant essentiels pour l'intégration des générateurs à entraînement direct dans les éoliennes qui ont de grands diamètres. Par ailleurs, on a pu faire ressortir les atouts d'un générateur innovant type à réluctance variable qui gagne beaucoup d'intérêt pour des applications éoliennes dans un futur proche.

Comme perspectives de poursuite des travaux actuels, il serait très intéressant d'optimiser ces deux topologies de machines avec des stratégies de contrôle adéquates pour une meilleure efficacité énergétique, surtout la *MRVBV* qui a l'avantage de la simplicité, la fiabilité et de bonnes performances pour un faible coût.

BEBLIOGRAPHIES



Bibliographies

- [1] Bernard Multon, « *Conception Et Alimentation Electronique Des Machines A Réductance Variable A Double Saillance* », L'école Normale Supérieure de Cachan, le 17 Mai 1994.
- [2] Bernard Multon, « *Historique Des Machines Electromagnétiques Et Plus Particulièrement Des Machines A Reluctance Variable* », LÉSIR (URA CNRS D1375), École Normale Supérieure de Cachan.
- [3] Belatel Mimi, « *Etude Des Machines Electriques Par C.A.O* », Doctorat en Sciences Université Mentouri Constantine, le 06 Juillet 2009.
- [4] Yasser Alhassoun, « *Etude Et Mise En Œuvre De* de Toulouse, le 27 Mai 2005.
- [5] Yvan Lefevre, Carole Henaux, Frédéric Messine, Bertrand Nogarede, « *Enjeux De La Modélisation Et De La Conception Des Actionneurs Electromécaniques Des Commandes De Vol Electrique* », C6E2 – WP2 – ENSEEIHT/LAPLACE-GREM3 14/09/2007.
- [6] Bernard Multon, Claude Jacques, « *Comparison Of Performances Of Two Self Commutated Electric Motors : The Permanent Magnet Brushless Dc Motor The Switched Reluctance Motor* », s.b3 Motorization Electrotechnique, VPCV'93, pp. 295-302.
- [7] D. Matt, J-F- Llibre, « *Performances Comparées Des Machines A Aimants Et A Réductance Variable. Maximisation Du Couple Massique Ou Volumique* », Journal de Physique III France 5 (1995), pp.1621-1641
- [8] John G.W. West, « *DC, Induction, Reluctance And PM Motors For Electric Vehicles* », Power Engineering Journal, pp. 77-88, April 1994.
- [9] Mounir Zeraoulia, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Demba Diallo, « *Electric Motor Drive Selection Issues For HEV Propulsion Systems: A Comparative Study* », IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, No. 6, Novembre 2006.

- [10] H. Ben Ahmed, B. Multon, « *Les Actionneurs Electromagnétiques : Quels Choix Pour La Robotique ?* », SATIE, ENS Cachan, Bretagne, UEB
- [11] Alan G. Jack, Barrie C. Mecrow, James A. Haylock, « *A Comparative Study of Permanent Magnet and Switched Reluctance Motors for High-Performance Fault-Tolerant Applications* », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, No. 4, July/August 1996, pp. 889-895.
- [12] Avoki M. Omekanda, Bruno lequesne, Harald Klode, Suresh Gopalakrishnan, Iqbal Husain, « *Switched Reluctance Versus Permanent Magnet* », IEEE Industry Applications Magazine, July/Aug 2009, www.ieee.org/ias, pp. 35-43.
- [13] Cüneyt Karacan, « *Comparison Of Performance Of Switched Reluctance Motors, Induction Motors And Permanent Magnet Dc Motors* », Middle East Technical University, for the Degree of Master of Science, April 2004.
- [14] B. Multon, H. Ben Ahmed, M. Ruellan, G. Robin, « *Comparaison Du Couple Massique De Diverses Architectures De Machines Tournantes Synchrones A Aimants* », Electrotechnique du Futur 2005, Grenoble, 14-15 Septembre 2005.
- [15] Emile Bowendnére Mouni, « *Contribution A L'amélioration Des Performances Des Génératrices Synchrones : Nouvelle Structure D'excitation Basée Sur Une Machine A Aimants Et Combinée A Des Lois De Commande Avancées* », Docteur de l'Université de Poitiers, Thèse Préparée au Sein du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Poitiers, le 25 Novembre 2008.
- [16] Y. Amirat, M.E.H. Benbouzid, H. Mangel, « *Etude Comparative de Génératrices pour Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne* », 12ème Colloque National de la Recherche dans les IUT, Brest, 1-2 juin 2006.
- [17] Drouen Laurent, Sculler Franck, Charpentier Jean-Frédéric, Smail Eric, Clenet Stéphane, « *Modèle Analytique De Pre-Dimensionnement De Machines Lentes A Aimants De Grand Diamètre Et A Grand Nombre De Pôles* », EF 2007 Conférence, ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007.

- [18] Nasser Hashernnia, Behzad Asaei, « *Comparative Study Of Using Different Electric Motors In The Electric Vehicles* », International Conference on Electrical Machines ICEM2008, pp. 1-5, Vilamoura, 6-9 September 2008.
- [19] Bernard Multon, Claude Jacques Auxilec, « *Comparaison Des Performances De Deux Moteurs Electriques Autopilotes : Le Moteur Synchrone A Aimants Permanents Le Moteur A Réductance Variable A Double Saillance* », LÉSiR, Ecole Normale Supérieure.
- [20] Khwaja M. Rahman, Babak Fahimi, G. Suresh, Anandan Velayutham Rajarathnam, 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.
- [21] Shuanghong Wang, Qionghua Zhan, Zhiyuan Ma, Libing Zhou, « *Implementation Of A 50-Kw Four-Phase Switched Reluctance Motor Drive System For Hybrid Electric Vehicle* », IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, No. 1, January 2005.
- [22] K. Ogawa, N. Yamamura, M. Ishida, « *Study For Small Size Wind Power Generating System Using Switched Reluctance Generator* », IEEE International Conference on Industrial Technology, (ICIT 2006), pp. 1510-1515, 15-17 December 2006.
- [23] Cheng K.W.E., Lin J.K., Bao Y.J., Xue X.D., « *Review Of The Wind Energy Generating System* », IEEE 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), pp. 01-07, 8-11 Novembre 2009, Hong Kong, China.
- [24] David G. Dorrell, Milutin Jovanovic, « *On The Possibilities Of Using A Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator In A 2 Mw Wind Turbine* », IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08, PP. 01-08, 5-9 October 2008.
- [25] A. Schramm, D. Gerling, « *Researches On The Suitability Of Switched Reluctance Machines And Permanent Magnet Machines For Specific Aerospace Applications Demanding Fault Tolerance* », IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, (SPEEDAM 2006), pp. 56-60, 23-26 Mai 2006, Taormina.

- [26] Hamid A. Toliyat, « *Recent Advances And Applications Of Power Electronics And Motor Drives- Electric Machines And Motor Drives* », IEEE 34th Annual Industrial Electronics Conference, (IECON 2008), pp. 34-36. 2008.
- [27] E.Afjei, H.Torkaman, « *Comparison Of Two Types Of Hybrid Motor/Generator* », International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, (SPEEDAM 2010), pp. 982 - 986, 14-16 June 2010, Pisa.
- [28] R. James, Jr. Hendershot, « *Brushless D.C. Motors Without Permanent Magnets* », Pacific Scientific Rockford Illinois, pp. 01-13, USA.
- [29] B. Multon, J. Bonal, « *Les Entraînements Electromecaniques Directs : Diversite, Contraintes Et Solutions Electromechanical Direct Drives : Variety, Constraints And Solutions* », La Conversion Electromécanique Directe. 4 Février 1999 - ENS Cachan - SEE.
- [30] A. Ben Ahmed, E. Aufauvre, B. Multon, « *Dimensionnement D'une Machine A Commutation Electronique Monophasée Haute Vitesse A Réductance Et Aimants Alternés* », Journal de Physique III France 7 (1997), pp. 2031-2058, Octobre 1997.
- [31] Virendra K. Sharma, M. A. Khan, Bhim Singh, S. S. Murthy, « *Comparison Of Power Quality Aspects Of Switched Reluctance And Permanent Magnet Brushless DC Motor* », Proceedings TENCON 2000, Vol. 3, pp. 300-303, 24-27 Septembre 2000, Kuala Lumpur.
- [32] Site : « <http://www.mpoweruk.com/motorsbrushless.htm> », « *Electric Drives - Brushless DC And Reluctance Motors - Description And Applications* », 23/02/2012.
- [33] Abdenour Abdelli, « *Optimisation Multicritère D'une Chaîne Eolienne Passive* », Doctorat de l'Université de Toulouse, le 15 Octobre 2007.
- [34] Jawad Ahmed Farooq, « *Etude Du Problème Inverse En Electromagnétisme En Vue De La Localisation Des Défauts De Désaimantation Dans Les Actionneurs A Aimants Permanent* », Docteur de l'Université de Technologie de Belfort - Montbelaird, le 05 Décembre 2008.
- [35] Daniel Fodorean, Abdellatif Miraoui, « *Dimensionnement Rapide Des Machines Synchrones A Aimants Permanents (MSAP)* », Techniques de l'Ingénieur, D 3 554.

- [36] Laurent Gasc, « *Conception D'un Actionneur A Aimants Permanents A Faibles Ondulations De Couple Pour Assistance De Direction Automobile Approches Par La Structure Et Par La Commande* », Docteur de l'Institut national Polytechnique de Toulouse, le 15 Novembre 2004.
- [37] Frédéric Gillon, « *Modélisation Optimisation Par Plans D'expériences D'un Moteur A Commutations Electroniques* », Docteur de l'Université de Lille, le 18 Décembre 1997.
- [38] Ounnadi Mohamed, « *Elaboration D'un Modèle D'étude En Régime Dynamique D'une Machine A Aimants Permanents* », Magister en Electrotechnique, Université de Tizi-ouzou, le 07 Avril 2011.
- [39] Ramdane Lateb, « *Modélisation Des Machines Asynchrones Et Synchrones A Aimants Avec Prise En Compte Des Harmoniques D'espace Et De Temps : Application A La Propulsion Marine Par POD* », Doctorat de L'I.N.P.L, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, le 19 Octobre 2006.
- [40] Soltane Belakehal, « *Conception & Commande Des Machines A Aimants Permanents Dédiées Aux Energies Renouvelables* », Doctorat en Sciences, Université de Constantine, le 10 Juin 2010.
- [41] Rebbah Redjem, « *Modélisation Et Optimisation D'une Structure De Machine A Réductance Variable Dédiée Aux Energies Renouvelables* », Doctorat en Sciences, Université de Constantine, le 08 Juillet 2010.
- [42] Luc Moreau, « *Modélisation, Conception Et Commande De Génératrices A Reluctance Variable Basse Vitesse* », Doctorat de l'Université de Nantes, le 09 Décembre 2005.
- [43] Yacine Amara, « *Contribution A La Conception Et A La Commande Des Machines Synchrones A Double Excitation Application Au Véhicule Hybride* », Docteur de l'Université paris XI, le 21 Décembre 2001.
- [44] Duc-Hoan Tran, « *Conception Optimale Intégrée D'une Chaîne Eolienne « Passive » : Analyse De Robustesse, Validation Expérimentale* », Doctorat de l'Université de Toulouse, le 27 Septembre 2010.

- [45] Thanh Dang, M. H. Rashid, « *Introduction, History, And Theory Of Wind Power* », IEEE North American Power Symposium (NAPS), pp.01-06, 4-6 Octobre 2009, Starkville, MS, USA.
- [46] M. Jamil, R. Gupta, « *A Review Of Power Converter Topology Used With PMSG Based Wind Power Generation* », IEEE Fifth Power India Conference, (PIC 2012), pp. 01-06, 19-22 Décembre 2012, Murthal.
- [47] A.D. Hansen, L. H. Hansen, « *Wind Turbine Concept Market Penetration Over 10 Years (1995 - 2004)* », Wind Energy dans Wiley Interscience, 10(1), pp. 81-97, 2006.
- [48] Y. Amirat, M.E.H. Benbouzid, B. Bensaker, R. Wamkeue, « *Generators For Wind Energy Conversion Systems: State Of The Art And Coming Attractions* », Journal of Electrical Systems, Vol. 3(1), pp. 26-38, 2007.
- [49] M.A. Mueller, « *Design And Performance Of A 20kw, 100rpm, Switched Reluctance Generator For A Direct Drive Wind Energy Converter* », IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC 2005), pp. 56-63, 15 Mai 2005, San Antonio, TX.
- [50] E.A.E. Jebaseeli, D. Susitra, « *Performance Analysis Of Various Configurations Of Switched Reluctance Machine For Wind Energy Applications* », IEEE Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change (RSTSCC 2010), pp. 419-423, 13-15 Novembre 2010, Chennai.
- [51] Brice Beltran, « *Contribution A La Commande Robuste Des Eoliennes A Base De Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique Au Mode Glissant d'Ordre Supérieur* », PhD Thesis (in French), University of Brest, 6 Juillet 2010.
- [52] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro, « *Power Conversion And Control Of Wind Energy Systems* », Wiley-IEEE Press, 2011.
- [53] E. Hau, « *Wind-Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics* », Springer, 2000.

- [54] R. Cardenas, W. F. Ray, G.M. Asher, « *Switched Reluctance Generators For Wind Energy Applications* », IEEE 26th Annual Power Electronics Specialists Conference, (PESC '95) Record, Vol. 1, pp. 559-564, 18-22 Juin 1995, Atlanta, GA.
- [55] D.A. Torrey, « *Switched Reluctance Generators And Their Control* », IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, February 2002.
- [56] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, « *A Review Of Power Converter Topologies For Wind Generators* », Renewable Energy, Vol. 32, Issue 14, pp. 2369–2385, Novembre 2007.
- [57] S. Mathew, « *Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis And Economics* », Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [58] Stefan Soter, Ralf Wegener, « *Development Of Induction Machines In Wind Power Technology* », IEEE International Electric Machines & Drives Conference, (IEMDC '07), Vol. 2, pp. 1490-1495, 3-5 Mai 2007, Antalya.
- [59] V. Kinnares, B. Sawetsakulanond, « *Characteristic Requirements Of A Small Scale Squirrel Cage Induction Generator For Effective Electricity Generation From Wind Energy* », Energy Procedia, Vol. 34, pp. 26-49, 2013.
- [60] L.H. Hansen, E. Blaabjerg, H.C. Christensen, U. Lindhard, « *Generators And Power Electronics Technology For Wind Turbines* », IEEE 27th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, (IECON 2001), Vol. 3, pp. 2000-2005, 2001, Denver, CO.
- [61] Site: « <http://www.abb.com/product/ap/seitp322/ef3aa662ddcbbca5c2256de3003dc875.aspx> »
- [62] Site: « <http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/tour/wtrb/electric.htm> »
- [63] R. Takahashi, H. Ichita, J. Tamura, M. Kimura, M. Ichinose, M. Futami, K. Ide, « *Efficiency Calculation Of Wind Turbine Generation System With Doubly-Fed Induction Generator* », IEEE XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010), pp. 01-04, 6-8 Septembre 2010, Rome.
- [64] Site : « http://www.repower.fr/fileadmin/download/produkte/PP_3.2M114_FR.pdf »

- [65] Andreas Petersson, « *Analysis, Modeling And Control Of Doubly-Fed Induction Generators For Wind Turbines* », Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2005.
- [66] Yang Yongbo, Jiang Bo, Yang Huayun, Ai Bing, Zha Xiaoming, « *Aggregating DFIGS In Power System Online Analysis* », IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM 2011), Vol. 2, pp. 63-67, 8-9 Septembre 2011, Wuhan.
- [67] Henk Polinder, Frank F. A. van der Pijl, Gert-Jan de Vilder, Peter J. Tavner, « *Comparison Of Direct-Drive And Geared Generator Concepts For Wind Turbines* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, Septembre 2006.
- [68] Jawahara lal Bhukya, « *Modeling And Analysis Of Double Fed Induction Generator For Variable Speed Wind Turbine* », IEEE International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS 2013), pp. 1324-1329, 10-12 Avril 2013, Nagercoil.
- [69] S. Muller, M. Deicke, R. W. de Doncker, « *Doubly Fed Induction Generator Systems For Wind Turbines* », IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 8, Issue 3, pp. 26-33, Mai/Juin 2002.
- [70] Y. Duan, R. G. Harley, T. G. Habetler, « *Multi-Objective Design Optimization Of Surface Mount Permanent Magnet Machine With Particle Swarm Intelligence* », IEEE Swarm Intelligence Symposium, (SIS 2008), pp. 01-05, 21-23 Septembre 2008, St. Louis MO USA.
- [71] Z. Zhang, A. Matveev, S. Øvrebø, R. Nilssen, A. Nysveen, « *Review Of Modeling Methods In Electromagnetic And Thermal Design Of Permanent Magnet Generators For Wind Turbines* », IEEE International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2011), pp. 377-382, 14-16 juin 2011, Ischia.
- [72] Site : « <http://www.theswitch.com/> »
- [73] R. Scott Semken, M. Polikarpova, P. Roytta, J. Alexandrova, J. Pyrhonen, J. Nerg, A. Mikkola, J. Backman, « *Direct-Drive Permanent Magnet Generators For High-Power Wind Turbines: Benefits And Limiting Factors* », IET Renewable Power Generation, Vol. 6, Issue 1, pp. 01-08, 2012.

- [74] J.A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, « *A Review Of Power Converter Topologies For Wind Generators* », IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC 2005), pp. 458-465, Mai 2005, San Antonio, TX.
- [75] Xu Yang, Dean Patterson, Jerry Hudgins, « *Permanent Magnet Generator Design And Control For Large Wind Turbines* », IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA 2012), pp. 01-05, 16-18 Juillet 2012, Denver, CO.
- [76] Tze-Fun Chan, Loi Lei Lai, « *Permanent-Magnet Machines For Distributed Power Generation: A Review* », IEEE Power Engineering Society General Meeting (PESGM 2007), pp. 01-06, 24-28 Juin 2007, Tampa, FL.
- [77] Hao Chen, Chao Zhang, Xucheng Zhao, « *Research On The Switched Reluctance Wind Generator System* », IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (ICSMC 2001), Vol. 3, pp. 1936-1941, 2001, Tucson, AZ.
- [78] R. Krishnan, « *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, And Applications* », Magna Physics Publishing, 2001.
- [79] Yao Duan, Roland G. Harley, « *Present And Future Trends In Wind Turbine Generator Designs* », IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA 2009), pp. 01-06, 24-26 Juin 2009, Lincoln, NE.
- [80] Henk Polinder, Jan Abraham Ferreira, Bogi Bech Jensen, Asger B. Abrahamsen, Kais Atallah, Richard A. McMahon, « *Trends In Wind Turbine Generator Systems* », IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics, Vol. 1, No. 3, Septembre 2013
- [81] Manufacturer VESTES : « <http://www.vestas.com/> »
- [82] Manufacturer SINOVEL : « <http://www.sinovel.com/> »
- [83] Manufacturer SUZLON : « <http://www.suzlon.com/index.aspx> »
- [84] Manufacturer GAMESA : « <http://www.gamesacorp.com/es/> »

- [85] Manufacturer ENORCON : « <http://www.enercon.de/de-de/> »
- [86] Manufacturer GEENERGY : « <http://www.ge-energy.com/wind> »
- [87] Manufacturer GOLDWIND : « <http://www.goldwindglobal.com/web/index.do> »
- [88] Manufacturer SIEMENS : « http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-spring-2013/html_en/wind-power.html »
- [89] Manufacturer MING YANG WIND : « <http://www.mywind.com.cn/English/index.aspx> »
- [90] Huguette Tiegna, Yacine Amara, Georges Barakat, Brayima Dakyo, « *Overview Of High Power Wind Turbine Generators* », IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012), pp. 01-06, 11-14 Novembre 2012, Nagasaki.
- [91] A. Lebsir, A. Bentounsi, M.E.H. Benbouzid, R. Rebbah, S. Belakehal, « *Comparative Study Of PMSM And SRM Capabilities* », IEEE 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2013), pp. 760-763, 13-17 Mai 2013, Istanbul, Turkey.
- [92] H. Chan, « *Implementation Of A Three-Phase Switched Reluctance Generator System For Wind Power Applications* », IEEE 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology (SELT 2008), pp. 01-06, 10-13 Juin 2008, Victoria, BC.
- [93] Vijay Babu Koreboina, L. Venkatesha, « *Modelling And Simulation Of Switched Reluctance Generator Control For Variable Speed Wind Energy Conversion Systems* », IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES 2012), pp. 01-06, 16-19 Décembre 2012, Bengaluru, India.
- [94] Site : « <http://www.wwindea.org/> »
- [95] T. Thiringer, J. Paixao, M. Bongiorno, « *Monitoring Of The Ride-Through Ability Of A 2 Mw Wind Turbine In Tvaaker, Halland* », Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Goteborg, Sweden, Tech. Rep., 2009.

- [96] P. Roshanfekar, « *Energy-Efficient Generating System For HVDC Off-Shore Wind Turbine* », Thesis for the degree of licentiate of engineering, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2013
- [97] V.B. Honsinger, « *Sizing Equation For Electrical Machinery* », IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.1, pp. 116-121, March 1987.
- [98] A.M. Mihai, S. Benelghali, Al. Simio, R. Outib, L. Livadaru, « *Design And FEM Analysis Of Five-Phase Permanent Magnet Generators For Gearless Small-Scale Wind Turbines* », IEEE XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM'2012), pp. 150-156, 2-5 September 2012, Marseille.
- [99] Ki-Chan Kim, Seung-Bin Lim, Ki-Bong Jang, Sung-Gu Lee, Ju Lee, Yeoung-Gyu Son, Young-Kil Yeo, Soo-Hyun Baek, « *Analysis On The Direct-Driven High Power Permanent Magnet Generator For Wind Turbine* », IEEE Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2005), pp. 243-247, 27-29 September 2005.
- [100] Sareni Bruno, Abdelli Abdenour, Roboam Xavier, Tran Duc-Hoan, « *Model Simplification And Optimization Of A Passive Wind Turbine Generator* », Renewable Energy, vol. 34, N° 12, pp. 2640-2650, ISSN 09601481, (2009).
- [101] Site : « <https://fr.wikibooks.org/wiki/Accueil> »
- [102] Site : « https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal »
- [103] Jaan Kiusalaas, « *Numerical Methods In Engineering With MATLAB®* », Cambridge university press, 2005, New York
- [104] William Bober, Chi-Tay Tsai, Oren Masory « *Numerical And Analytical Methods With Matlab®* », CRC Series in Computational Mechanics and Applied Analysis, et Taylor & Francis Group, Version Date: 2013/11/20.
- [105] Site : « <http://www.femm.info/wiki/HomePage> »

Résumé

Cette thèse de doctorat a pour objectif l'étude, la conception puis la comparaison des performances de générateurs innovants adaptés à la conversion des énergies renouvelables, particulièrement l'énergie éolienne à entraînement direct. A partir d'un cahier des charges spécifiant notamment la puissance (1.5 MW) et la vitesse (1.55 rad/s), nous avons dimensionné analytiquement deux topologies innovantes de machines à associer à une turbine éolienne de puissance élevée, sans boîte de vitesses.

La première topologie est une *Machine Synchrone à Aimants Permanent à Basse Vitesse (MSAPBV)*, donc à grand nombre de pôles et à grand diamètre. A partir d'un modèle analytique, nous avons calculé les dimensions principales de la *MSAPBV* et simulé le fonctionnement de la génératrice à partir d'une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis.

La deuxième topologie dimensionnée est un aérogénérateur innovant de type *Machine à Reluctance Variable à Basse Vitesse (MRVBV)*, donc à grand nombre de pôles et à grand diamètre. A partir d'un modèle analytique, nous avons ici aussi calculé les dimensions principales de la *MRVBV* et simulé son fonctionnement à partir d'une approche numérique par la méthode des éléments finis.

Pour conclure, nous avons effectué une analyse comparative des équations de dimensionnement, des volumes, masses et coûts des deux différentes topologies d'aérogénérateurs étudiées (*MSAPBV* et *MRVBV*). Nos travaux se sont essentiellement axés sur la génératrice à aimants permanents car cette machine semble être la plus rentable et la plus utilisée ces dernières années. Cependant, grâce aux développements réalisés dans différents domaines et avec le coût élevé de l'aimant, la génératrice à reluctance variable intéresse de plus en plus chercheurs et industriels pour des applications éoliennes.

Mots-clés : *dimensionnement, aérogénérateur, éolienne à attaque directe, machine synchrone à aimants permanents, machine à réluctance variable, performances, méthode éléments finis, FEMM, MATLAB*

Abstract

This thesis aims to: study, design and comparison of innovative generators adapted to the conversion of renewable energies, especially wind power in a direct drive. From a power (1.5 MW) and speed (1.55 rad / s) data given, we are dimensioned analytically two innovative topologies of machines to associate with a wind turbine with high power without gearbox.

The first topology is a *Permanent Magnets Synchronous Machine with Low Speed (PMSMLS)* and the second topology is an innovative generator for wind turbine that is the *Switched Reluctance Machine with Low Speed (SRMLS)*, therefore, with large diameters. Start by an analytical model, we calculated the main dimensions of *PMSMLS* and the *SRMLS* and simulated operation of the generators from a numerical approach based on the finite element method.

Eventually, we performed a comparative analysis of design equations, volumes, weights and costs of two different topologies of wind turbines generators studied (*PMSMLS* and the *SRMLS*).

Our work was mainly focused on the permanent magnet generator because this machine seems to be the most cost effective and most widely used in recent years. However, thanks to developments made in different areas and with the high cost of the magnets, the switched reluctance generator interests more researchers and industry for wind generators applications.

Key-words: *design, wind turbine, direct drive, permanent magnet synchronous machine, switched reluctance machine, performances, finite element method, FEMM, MATLAB*

المملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى درلة وتصميم ومقارنة مولدات بمتكزة من لبل لفل طاقات التجددة، لاسي مة تحويل طاقة الرياح عن طري ؤل لتوي ر البث رر. و طالقاً من بي ليات معطات: قوة (5.1 مي غواط) وسرعة (5.11 راد / ث)، قمنا بتصميم من و ع من الم حركات العر ب عي ؤال بمتكزة للصلة ب طاق ؤل ري اح ذات لطاق ؤال لري ؤة لتوي ر لليب اش ر أي بدون ع لبة ضبط لسرعة. و هدفنا ح الم ج التلق ايل في استع م الم ول ه لثق ال يدي ؤة وبسي ط ل لسل ؤال تحويل.

النوع أول هو محرك مبل ي ن تزامن ذو غن اطي سد ائ م و سر عة في قصرة و لثان ي بمتك ر هو محرك مبل ي ذو ممل عة ب تغيرة و سر عة في قصرة، و ال الم حركي ن ذوق طري ك ي ر.

من خال ل ن م ل ت ج ل ي ل ي ؤة، ق في ب ح ر اب الب ع ا د ال ل ي س ي ؤة و م ح ك ا ؤ ال م ل ي ن الع ر ب ع ي ن ل ي لى لئ اس الن م ذ ج ؤال و ق ي ؤة بالائ س ن ا د لى ط ر ي ق ؤال ع ن ص ر ال م ت ي ؤة.

في الن ه ل ي ؤة، أ ج ي ن ت ح ل ال م ق ا ر ن ال م ع ا د ل ا ت ال ت ص ر ي م و الأ ح ج ا م و الأ و ز ا ن ت ك ف ي ؤة ال الم ل ي ن، ق ي ت ر ك ز ع ن ل ب ش ر ك ل ئ ي س ي ل ي لى م ل د ا ل غ ن ا ط ي س ال ن ا ي م ل م ا ي ت م ي ز ب ه م ر ف ع ل ي ؤة و أ د ا ؤ ج ي د و م ل ح و ط م ح ي ت ل ص ب ح ي ن ت خ د م ل ي لى ن ط ا ق و ا س ع ي ال س ر ن و ا ت الأ خ ي رة. و م ع لئ ك، و ب ف ض ل ال ت ط و ر ا ت ال ح ق ق ت ي م ص ل ف ال م ج ال ا ت و م ع لئ ك ف ي ؤة ال ع ل ي لى م ن م ن ا ط ي س، ج ث و ت ال م ح ر ك ال ك م و ا ي لى ذو م م ل عة ب ت غ ي ر م ن ث ر أ ه ي ق ب ا ن س ل ط ا ق ب ا غ ي ن ل و ط ر ن ا ع ي ن ال ت ط ب ي ق ا ن ت ف ي ط ا ق ا ق ر ي ا ح.

لكل مات- همت ا ح ي ؤة بتصميم وتو ع ي ن ا ت ال ري ا ح لتوي ر ب ا ش ر، أ لة ن ت ز ا م ن ذو م ن م ا ط ي س د ا ئ م، م ح ر ك ال ك م و ا ي لى ذو م م ل عة ب ت غ ي رة، ط ر ي ق ؤال ع ن ص ر ال م ح د و دة، م ل ا ب ف ي ي م.

