

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

-----00-----

UNIVERSITE DE CONSTANTINE

Faculté des sciences de l'Ingénieur

Département d'Electrotechnique

THÈSE

Présentée pour obtenir le titre de:

Doctorat en sciences

Spécialité : Electrotechnique

Option: Commande

Par : ***Soltane BELAKEHAL***

Thème

Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables

Soutenue le 10/06/ 2010.

Devant le jury :

Président	BOUZID Aissa	Prof	U. Constantine
Rapporteur	BENALLA Hocine	Prof	U. Constantine
Co- Rapporteur	BENTOUNSI Amar	M.C	U. Constantine
Examineurs	DIB Abderahmane	M.C	U. Oum El Bouaghi
	ARROUF Mohamed	M.C	U. Batna
	CHENNI Rachid	M.C	U. Constantine

Avant propos

Le présent travail dans cette thèse a été réalisé au laboratoire d'électrotechnique de Constantine (L.E.C).

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **BENTOUNSI Amar** Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université de Constantine pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail.*

Je tiens à exprimer encore mes sincères remerciements à :

*Monsieur **BENALLA Hocine** professeur au département d'Electrotechnique à l'université de Constantine, pour avoir accepté la tâche de rapporteur de ce travail, ses conseils, suggestions, et ses directives tout au long de ce travail.*

*Monsieur **BOUZID Aissa**, professeur au département d'Electrotechnique à l'université de Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Monsieur **DIB Abderrahmane**, Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université de Oum El Bouaghi, pour avoir accepté de consacrer du temps à mon travail et pour avoir participé à mon jury.*

*Monsieur, **ARROUF Mohamed**, Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université de Batna, pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.*

*Monsieur **CHENNI Rachid**, Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université de Constantine pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.*

Je tiens également à présenter ma plus vive sympathie aux collègues : Merzoug M^{ed} salah, Louze lamri, Yazid khaled, Nezzari hacen, Ghediri A. halim et Sakri djamel.

SOMMAIRE

<i>Introduction générale</i>	1	
 <i>Chapitre- 1 : Etat de l'art des systèmes d'énergies renouvelables</i>		
1.1	Introduction	3
1.2	Les énergies renouvelables	3
1.2.1	L'énergie hydraulique	4
1.2.2	L'énergie de la biomasse	5
1.2.3	L'énergie de la géothermie	5
1.2.4	L'énergie Solaire	5
1.2.5	L'énergie éolienne	6
1.3	Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	6
1.3.1	Potentiel solaire	7
1.3.2	Potentiel éolien	8
1.3.3	Les énergies géothermiques, issues de la biomasse et hydraulique	9
1.4	Transformation de l'énergie du vent et du soleil en électricité	10
1.4.1	Conversion de l'énergie photovoltaïque	10
1.4.1.1	Type de systèmes photovoltaïques	10
1.4.1.1.a	Systèmes autonomes	11
1.4.1.1.b	Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	11
1.4.2	Avantages et inconvénients d'une installation PV	11
1.4.2.a	Avantages	11
1.4.2.b	Inconvénients	11
1.5	Contexte de la conversion d'énergie éolienne	12
1.5.1	Différents types d'aérogénérateurs	12
1.5.2	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	13
1.5.3	Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne	14
1.5.3.1	Systèmes utilisant la machine asynchrone	14
1.5.3.2	Systèmes utilisant la machine synchrone	16

1.5.4	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	18
1.5.4.a	Avantages	18
1.5.4.b	Inconvénients	18
1.5.5	Génératrices synchrones lentes pour les applications éoliennes	18
1.5.5.1	Structures des machines à aimants permanents	18
1.5.5.1.a	Les machines sans pièces polaires	19
1.5.5.1.b	Les machines avec pièces polaires	19
1.5.5.2	Différentes types de stators	20
1.5.5.3	Les aimants permanents	21
1.5.4.3.a	Propriétés générales des aimants	21
1.5.4.3.b	Les différentes familles des aimants	22
1.6	Systèmes hybrides	23
1.6.1	Systèmes hybrides DC pour des petites communautés isolées	24
1.6.2	Systèmes hybrides AC pour des petites communautés isolées	24
1.7	Convertisseurs	25
1.8	La charge	26
1.9	Conclusion	26

Chapitre- 2 : Dimensionnement et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

2.1	Introduction	27
2.2	Dimensionnement de la machine synchrone à aimants permanents	27
2.2.1	Configuration de la machine	27
2.2.2	Définition des paramètres	28
2.2.3	Démarche de dimensionnement	28
2.2.4	Hypothèses de dimensionnement	28
2.2.5	Les formules du dimensionnement de la machine	30
2.2.6	Modèle circuit de la génératrice	32
2.2.7	Adaptation du bobinage à la tension d'alimentation	32
2.2.8	Champ produit par les courants statoriques	34
2.3	Détermination des grandeurs caractéristiques de la machine	34

2.3.1	Calcul de la fem induite	35
2.3.2	Puissances	35
2.3.4	Calcul des pertes	36
2.3.4.1	Les pertes cuivre	36
2.3.4.2	Les pertes fer	37
2.3.4.3	Les pertes supplémentaires	37
2.3.5	Le rendement	37
2.4	Résultats obtenus par les formules analytiques du dimensionnement	37
2.5	La méthode des éléments finis	39
2.5.1	Logiciel de résolution	40
2.5.2	Structure de FLUX 2D	41
2.5.2.1	Module pré processeur	41
2.5.2.2	Module processeur	41
2.5.2.3	Module post-processeur (PostPro_2D)	42
2.6	Validation par calcul du champ de la machine	46
2.7	Conclusion	47

Chapitre- 3 : Modélisation et commande du système de conversion photovoltaïque

3.1	Introduction	48
3.2.1	La cellule photovoltaïque	48
3.2.2	Le semi-conducteur	48
3.2.3	Modèle d'une cellule solaire	50
3.2.4	Présentation du modèle mathématique	51
3.2.5	Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	52
3.2.6	Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V)	54
3.3	Les modules photovoltaïques	54
3.4	Les générateurs PV	55
3.5	Résultats et Interprétations	56
3.6	Principe de la recherche du point de puissance maximal	57
3.6.1	Les algorithmes du point de puissance maximale	59
3.6.2	La méthode incrémentation de la conductance (IncCond)	60

3.7	Principe de la commande MPPT	62
3.7.1	Hacheur survolteur	62
3.7.2	Modélisation du hacheur survolteur	63
3.7.3	Commande du hacheur survolteur	64
3.7.4	Résultats de simulations	66
3.8	Conclusion	69

***Chapitre- 4 : Modélisation et commande du système de
conversion éolienne***

4.1	Introduction	70
4.2	Modélisation du générateur éolien	70
4.2.1	Modèle du vent	71
4.2.2	Modèle de la turbine	71
4.2.3	Modèle du multiplicateur	74
4.2.4	Modélisation de l'arbre de la machine	74
4. 2.5	Modèle de la machine synchrone	75
4. 2.6	Modélisation de l'association MSAP – redresseur commandé	78
4. 2.6.1	Introduction	78
4.2.6.2	Modèle mathématique du redresseur commandé	79
4.3	Commande du générateur éolien	81
4. 3.1	Stratégie de maximisation de la puissance	82
4. 3.1.1	Résultats de simulations	83
4. 3.2	Commande de la l'association MSAP – redresseur	85
4. 3.2.1	Régulation de courant	86
4.3.2.2	Régulation de la tension	86
4. 3.2.3	Résultats de simulations	89
4. 4	Conclusion	92

**Chapitre- 5 : Application du système hybride
Éolienne- photovoltaïque**

5.1	Introduction	93
5.2	Système de conversion d'énergie hybride	93
5.2 .1	Résultats de simulations	95
5.3	Application au système hybride de pompage d'eau	97
5.3.1	Description du système	97
5.3.2	Types de moteurs utilisés	98
5.3.3	Type de la pompe utilisée	99
5.3.3.1	Constitution d'une pompe centrifuge	99
5.4	Présentation du modèle mathématique de la motopompe	100
5.4.1	Modèle du moteur	100
5.4.2	Modèle de la pompe centrifuge	100
5.4.2.1	Caractéristique hauteur –débit	101
5.4.2.2	Caractéristique couple vitesse	101
5.4.3	Modèle de la canalisation de refoulement	102
5.5	Simulation du système de pompage d'eau	103
5.5.1	Présentation du modèle mathématique	103
5.5.2	Résultats de simulation	103
5.6	Connexion du générateur hybride sur le réseau	105
5.6.1	Modélisation de filtre LC	105
5.6.2	Structure de commande	109
5.6.3	Résultats de simulations	110
5.7	Conclusion	113
	Conclusion générale	114
	Bibliographie	116
	Annexe – A - Rappel sur la transformation de Park	122
	Annexe – B - Formule de Betz	123
	Annexe – C - Principaux paramètres des éléments considérés du système	124
	Annexe – D - Commande du système éolien avec un pont de diodes	127

Introduction générale

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois [1]. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir !

Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité). Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. **La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie éolienne associée au solaire photovoltaïque.**

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent.

L'utilisation de l'énergie hybride (solaire-éolien) est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération

ou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes. L'ampleur de l'utilisation de l'énergie hybride nous amène à étudier un système de pompage éolien-photovoltaïque d'eau composé d'un générateur hybride couplé directement à un moteur à courant continu à aimants permanents qui entraîne une pompe centrifuge.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en 5 chapitres :

- Le premier chapitre expose les différentes sources d'énergies renouvelables existantes ; nous focalisons notre attention sur la production d'électricité éolienne et photovoltaïque ainsi que sur les principes généraux des machines synchrones à aimants permanents (MSAP).
- Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement de la génératrice intégrée à la chaîne éolienne par la méthode analytique, calcul du champ magnétique et les différentes grandeurs caractéristiques de la machine utilisée. Afin de valider cette méthode adoptée, une analyse par la méthode des éléments finis a été effectuée.
- Le chapitre trois présente la modélisation et la commande de système de conversion photovoltaïque (générateur PV, convertisseur DC-DC) du point de vue de l'estimation de la production d'énergie à partir de données de l'éclairement.
- Le chapitre quatre est consacré à la modélisation et la commande du générateur éolien (machine à aimants et redresseur commandé) du point de vue de l'estimation de la production d'énergie à partir de données de vitesse de vent.
- Le dernier chapitre traite d'une l'application de l'énergie hybride dans un site isolé (système de pompage d'eau ou raccordé au réseau passif).

Nous concluons par une synthèse des travaux réalisés et des perspectives d'amélioration.

Chapitre - 1 :

Etat de l'art des systèmes d'énergies renouvelables

1.1 Introduction

La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles (nucléaire). Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. Selon [2], la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂. L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole limitées (*moins de 100 ans au rythme actuel de consommation*).

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui, pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'année au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa propre santé que pour ses installations électriques.

1.2 Les énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en oeuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins [3]. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de

dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. La figure (1.1) présente la production mondiale d'électricité en 2005 et la figure (1.2) fait un zoom sur les énergies renouvelables.

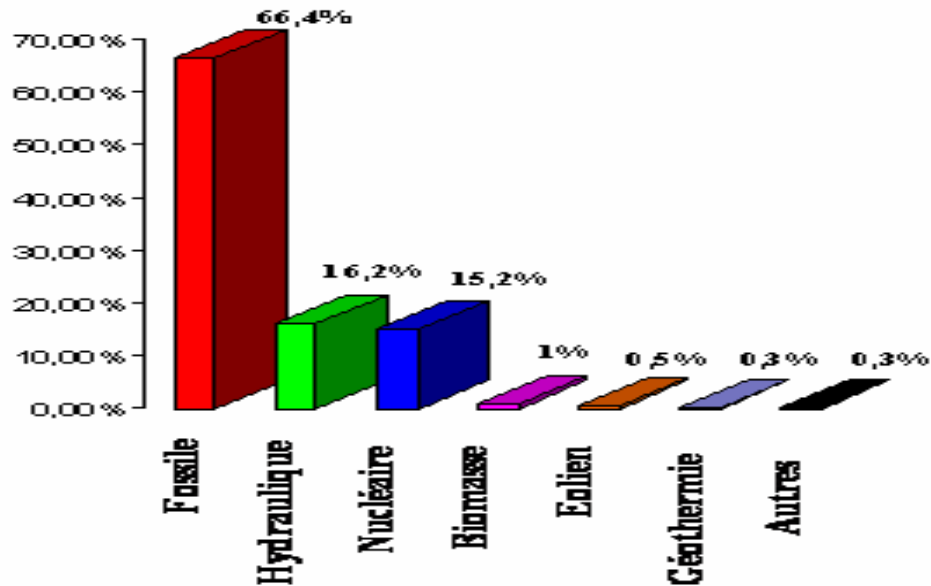


Figure (1.1) : Structure de la production d'électricité mondiale en 2005

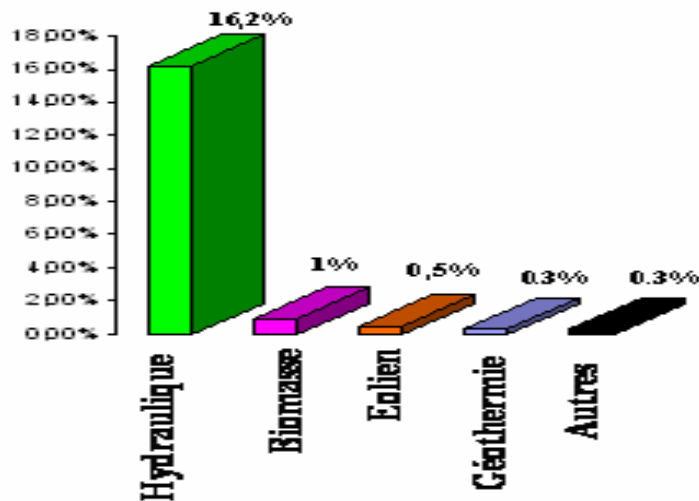


Figure (1.2) : Production d'électricité à partir de sources renouvelables en 2005

1.2.1 L'énergie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On discerne la petite hydraulique

(inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on va considérer essentiellement la petite hydraulique [4]. La petite hydraulique est constituée en grande majorité par des centrales au fil de l'eau ce qui les rend fortement dépendantes du débit des cours d'eau.

1.2.2 L'énergie de la biomasse

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...)

En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1 % de la production d'électricité mondiale [5].

1.2.3 L'énergie de la géothermie

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- la géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [6].
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie.

1.2.4 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée

reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [7].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.
- **L'énergie solaire passive:** est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

1.2.5 L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [8]. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 [9], soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

1.3 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

Le potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 500 MW cette année 2010, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite [10].

La répartition de la puissance installée par application:

Application	Puissance installée (KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58 %
Télécommunication	498	21 %
Pompage	288	12 %
Eclairage public	48	2 %
Autres	166	7 %

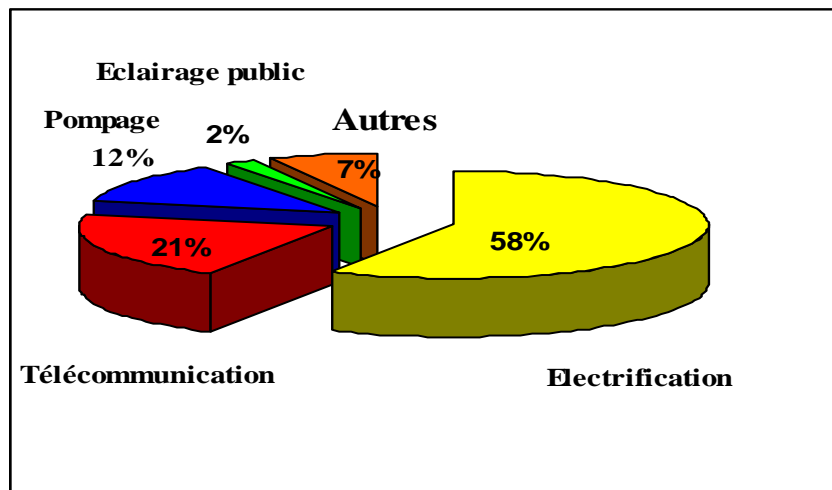


Figure (1.3) : Répartition des usages de la filière ER en Algérie

1.3.1 Potentiel solaire

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [10].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

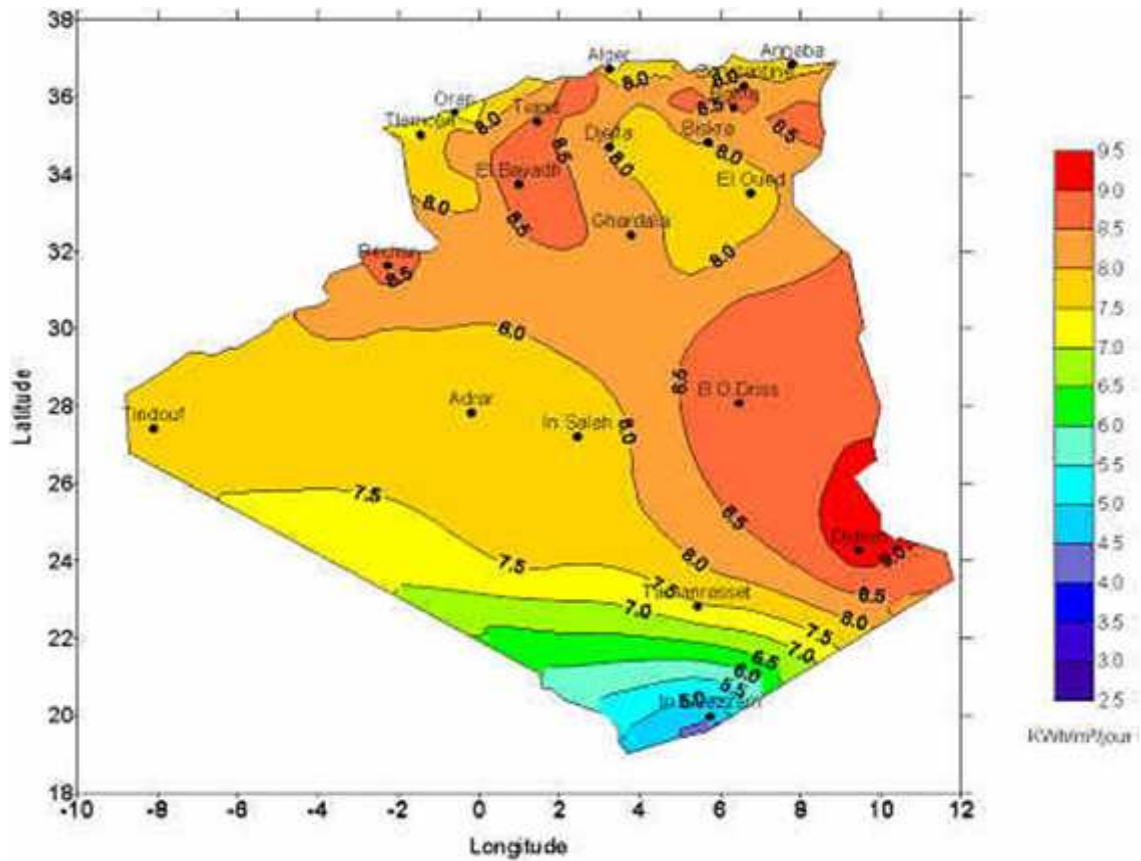


Figure (1.4) : Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)

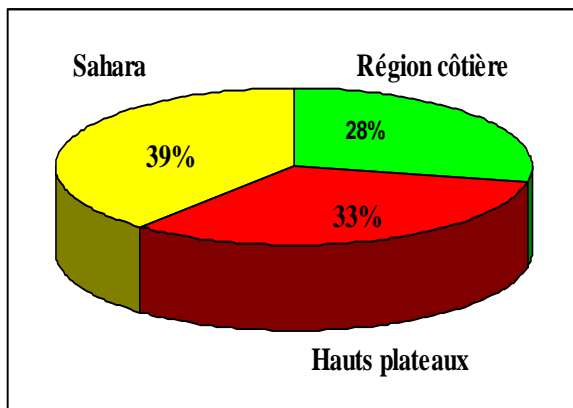


Figure (1.5) : Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie

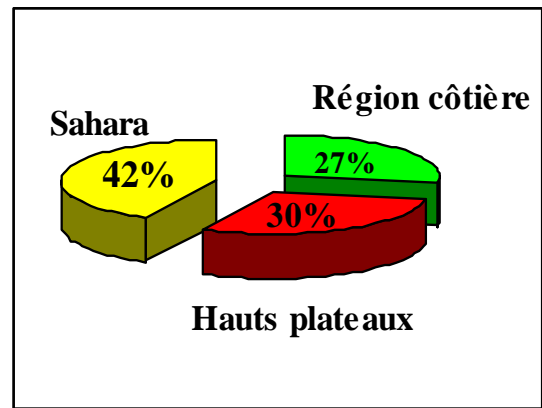


Figure (1.6) : Energie moyenne reçue en Algérie

1.3.2 Potentiel éolien

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse

les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar [10].

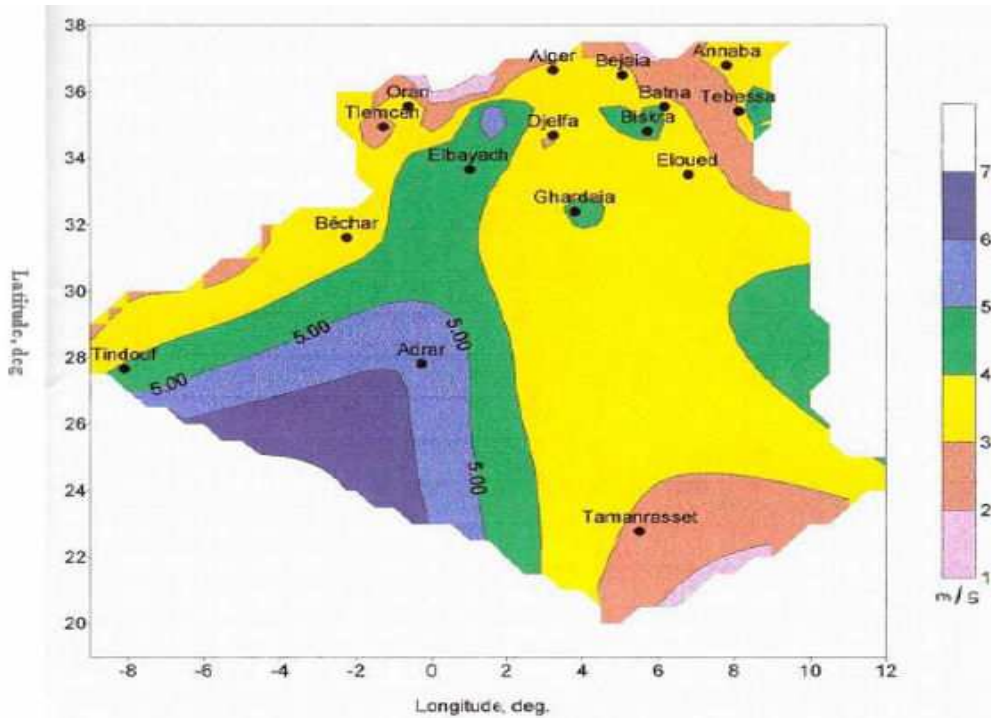


Figure (1.7) : Carte des vents en Algérie

1.3.3 Les énergies géothermiques, issues de la biomasse et hydraulique

Plus de 200 sources d'eau chaude ont été répertoriées dans le nord est et le nord ouest de l'Algérie. Environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45°, la plus chaude étant située à Biskra (118°). Plus au sud, délimitée par Biskra au nord, In Salah au sud et Adrar à l'ouest, la nappe albienne constitue une zone de plusieurs milliers de km, caractérisée par une eau à température moyenne de 57°. L'ensemble du débit d'exploitation des sources et de cette nappe représente une puissance estimée à 700MW/an.

Le potentiel de biomasse se répartit entre les déchets issus des activités humaines, déchets urbains et agricoles non recyclés, estimés à 1,33 MTEP/an (Tonne équivalent pétrole) et l'énergie issue du bois des forêts [10]. Cette dernière représente 37 MTEP/an et le potentiel récupérable de 3,7 MTEP/an.

La part de l'énergie hydraulique dans la production nationale d'électricité est encore faible (1,7% de la production installée), et cela est dû au nombre insuffisant de sites et à la faible exploitation de ceux existants.

1.4 Transformation de l'énergie du vent et du soleil en électricité

A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables (issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse) sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Les filières étudiées dans ce travail sont l'énergie *éolienne* et *solaire photovoltaïque*.

1.4.1 Conversion de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [11]. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, le point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible. Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique.

1.4.1.1 Type de systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont deux types : autonomes et reliés au réseau [12] :

1.4.1.1.a Systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

1.4.1.1.b Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Etant donnée que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.

1-4.1.2 Avantages et inconvénients d'une installation PV [13]

1-4.2.2.a Avantages

- d'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli-Watt au Méga-Watt.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1-4.2.2.b Inconvénients

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV . Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- tributaire des conditions météorologiques.
- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

1.5 Contexte de la conversion d'énergie éolienne

1.5.1 Différents types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [14] :

- les turbines éoliennes à axe horizontal
- les turbines éoliennes à axe vertical

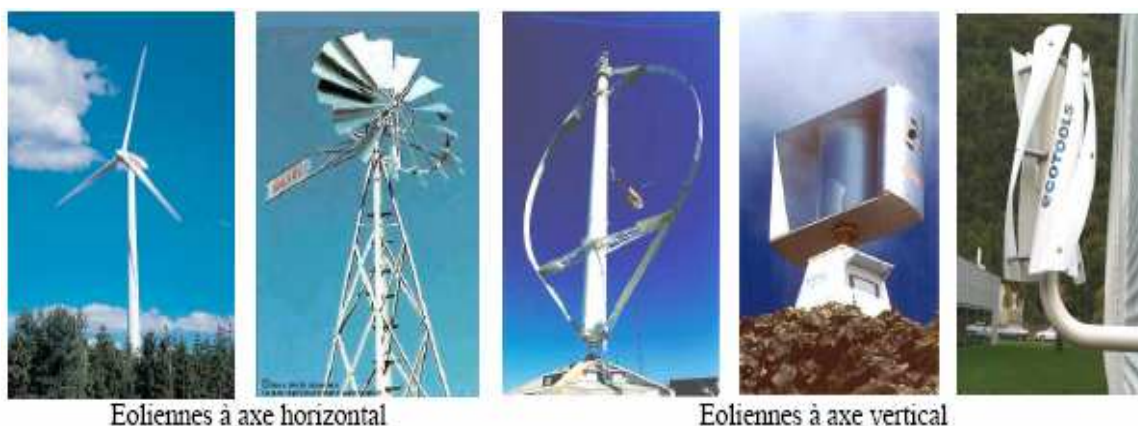


Figure (1.8) : Technologies d'éoliennes [14]

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

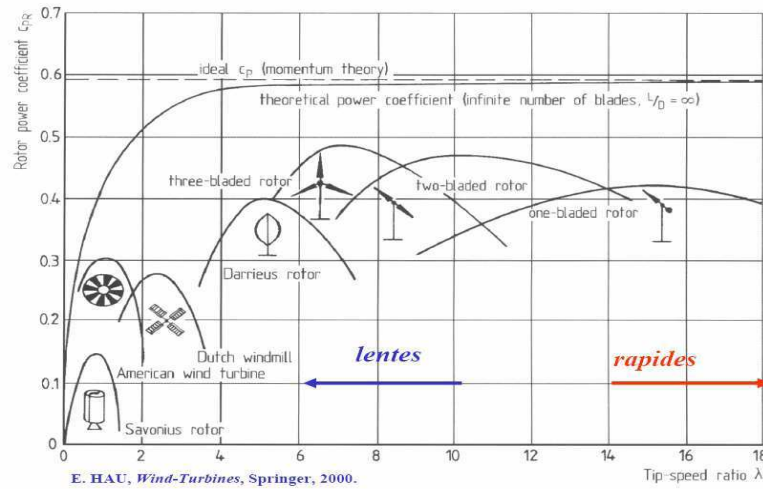


Figure (1. 9) : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales, tiré de [15]

1.5.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_n qui est obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent V_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi [16]:

- la vitesse de démarrage, V_d à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent, V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n , V_d et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure (1.10)) :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ;

- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

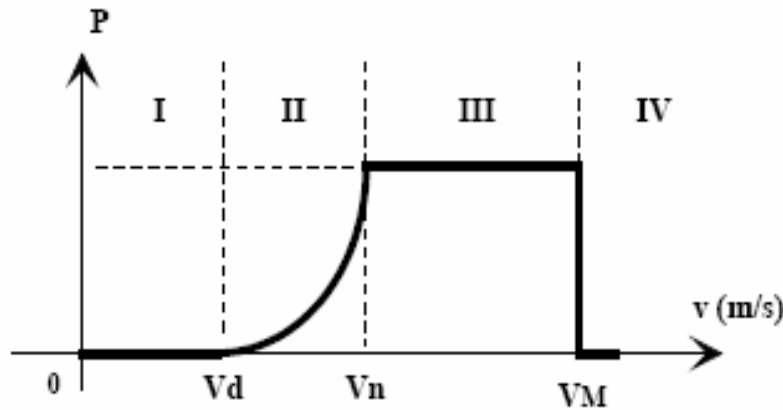


Figure (1.10) : Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

1.5.3 Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. En fonction du type de générateur utilisé, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens :

- système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (*S.E.I.G.*)
- système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (*D.F.I.G.* ou *MADA*)
- système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants.

1.5.3.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

La machine asynchrone équipe actuellement une grande partie du parc éolien. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût.

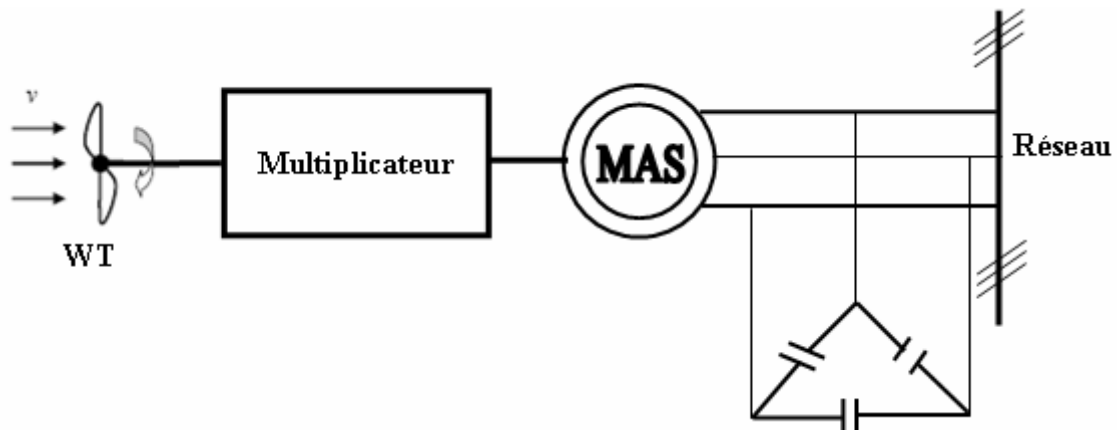


Figure (1.11) : Machine asynchrone avec liaison direct au réseau

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau (Figure (1.11)). Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [17]. Cette structure est largement employée au Danemark depuis les années 70. Le dispositif de la figure (1.12) permet de fonctionner à vitesse variable. Le redresseur à diodes fournit une tension continue variable en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne qui peut être exploitée par un onduleur MLI pour renvoyer sur le réseau une tension alternative à la fréquence adéquate et des courants sinusoïdaux.

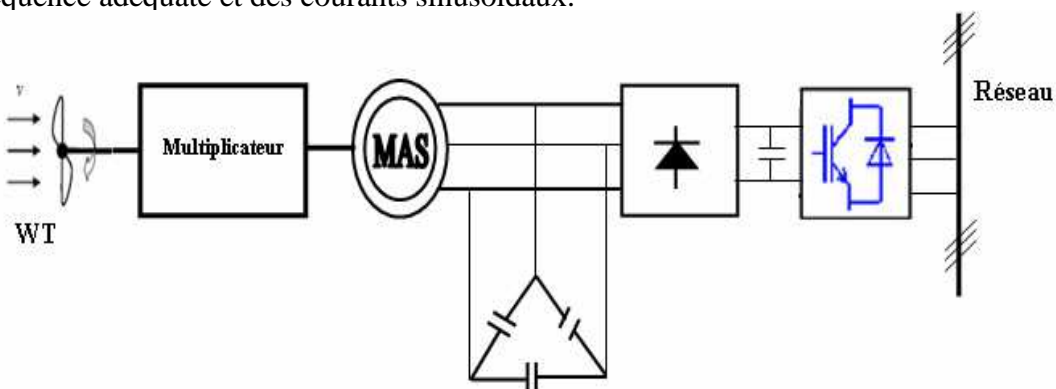


Figure (1.12) : Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau

La magnétisation de la machine s'effectue avec un banc de condensateurs. Cette solution met en œuvre des convertisseurs de puissance qui doivent être dimensionnés pour la puissance totale envoyée par le générateur sur le réseau (coût et pertes

importants) et des condensateurs pénalisants en termes de coût. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure.

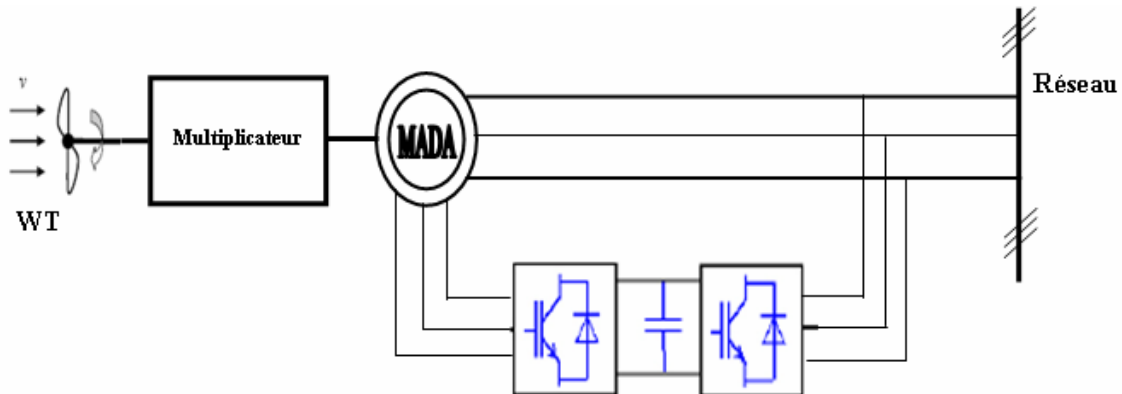


Figure (1.13) : MADA avec 2 convertisseurs MLI en cascade reliés au réseau

La figure (1.13) montre une configuration avec la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). La MADA a la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA. C'est sur ce bobinage de moindre puissance que le convertisseur de puissance, composé d'un ensemble redresseur/onduleur MLI en cascade, est inséré afin de contrôler la vitesse de rotation de la machine. Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Celui-ci a une puissance de l'ordre de 30 % de la puissance nominale fournie au réseau [18].

1.5.3.2 Systèmes utilisant la machine synchrone

La Machine Synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles.

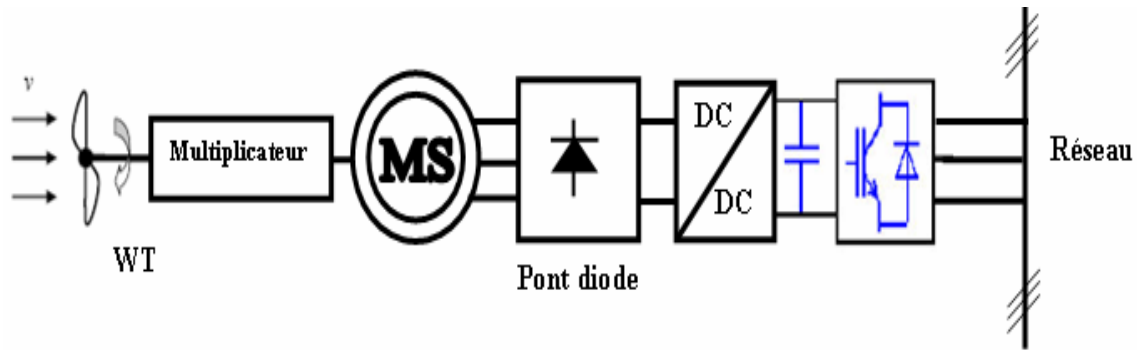


Figure (1.14) : Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble redresseur à diodes, convertisseur DC/DC et onduleur MLI.

Un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC, peut être utilisé (figure (1.14)). Cette solution est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI ; de plus le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la chaîne de conversion est plus faible (trois contre quatre).

La machine synchrone peut être associée à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (figure (1.15)).

La topologie utilisant un redresseur à diodes et un boost comme convertisseur DC/DC est considérée comme la configuration optimale par Carlsson au regard du coût, de la qualité de l'énergie et du facteur de puissance [18].

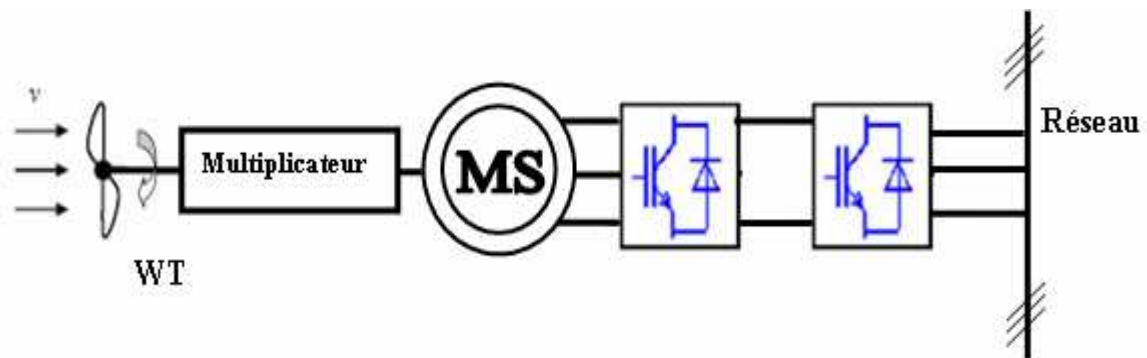


Figure (1.15) : Machine synchrone au réseau par deux convertisseurs MLI en cascade

La structure de la figure (1.15) peut aussi être utilisée avec une MAS [20]. Dans ce cas, le redresseur MLI assure la magnétisation de la machine asynchrone et le banc de condensateurs n'est plus nécessaire.

1.5.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tous système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

1.5.4.a Avantages

- non polluante
- inépuisable (énergie du vent)
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés)
- peut être complémentaire des filières traditionnelles.

1.5.4.b Inconvénients

- aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent)
- bruit des pales
- impact visuel
- interférences électromagnétiques

1.5.5 Génératrices synchrones lentes pour les applications éoliennes

Aujourd'hui, la plupart des machines synchrones utilisées dans l'éolien sont des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP). Par rapport à la machine à excitation, la MSAP a un meilleur rendement et un meilleur couple massique. L'inconvénient de la MSAP réside dans le prix des aimants terres rares (assemblage).

1.5.5.1 Structures des machines à aimants permanents

Les structures des machines à aimants permanents sont très variées et plusieurs classifications sont possibles suivant les critères retenus. Outre les différentes configurations mécaniques possibles (Machines à rotor extérieur, machines à rotor

intérieur), on s'attachera à distinguer les structures par les différences qui en résultent sur les propriétés électromagnétiques en commutation électronique. On peut alors distinguer les machines sans pièces polaires et les machines avec pièces polaires [21].

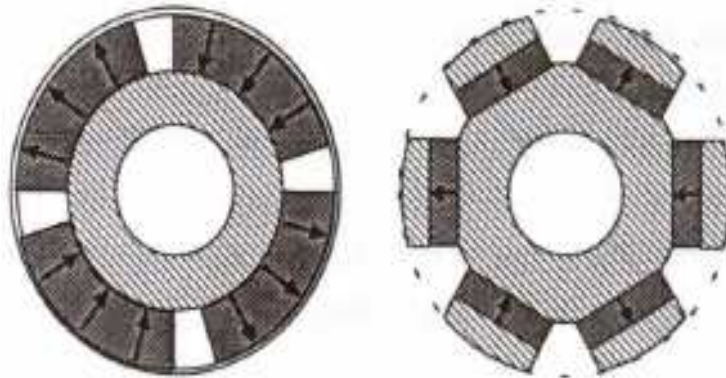


Figure (1.16) : Différentes structures de rotor intérieur à aimants permanents

1.5.5.1.a Les machines sans pièces polaires

Les machines sans pièces polaires comportent un rotor dont les aimants sont montés en surface, en périphérie du noyau magnétique rotorique et sont maintenus par collage ou frettage. La frette doit être amagnétique et éventuellement non conductrice si on veut éviter la circulation de courants induits par les harmoniques de l'alimentation. Son épaisseur s'ajoute à l'entrefer mécanique de sorte que l'épaisseur des aimants doit être suffisante afin de fournir un niveau d'induction voulu dans l'entrefer.

Ce type de structure se caractérise principalement par une réluctance constante le long de l'entrefer. L'inductance est donc constante et de faible valeur en raison de la perméabilité de l'aimant souvent proche de μ_0 s'ajoutant à un entrefer assez large pour loger la frette sur les rotors intérieurs. On peut obtenir une force électromotrice quasi trapézoïdale si les aimants sont à aimantation radiale et l'entrefer réduit, utile pour une alimentation par courants rectangulaires sans ondulations de couple [22].

La simplicité de réalisation de ces structures les rend particulièrement avantageuses pour des actionneurs performants à faible coût.

1.5.5.1.b Les machines avec pièces polaires

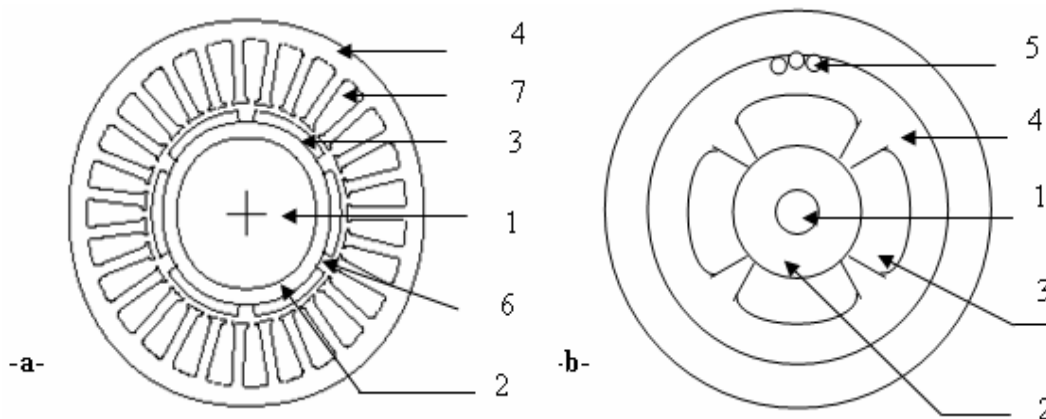
Le rôle des pièces polaires consiste à élever l'induction dans l'entrefer à une valeur supérieure à celle fournie par les aimants, particulièrement lorsque l'on y ajoute un effet de concentration géométrique du flux magnétique. On peut distinguer deux types de machines avec pièces polaires:

- les rotors avec aimants sous les pièces polaires comportant des aimants disposés contre le noyau magnétique. Ces aimants peuvent être de forme parallélépipédique à aimantation parallèle ou en forme de tuile aimantée radialement.
- les rotors à concentration de flux qui utilisent l'aimantation tangentielle d'aimants généralement parallélépipédiques disposés entre les pièces polaires contre un arbre aimantique. Ces dernières réalisent une concentration de flux à condition que le nombre de pôles soit suffisamment élevé, ce qui permet d'augmenter le module du champ dans l'entrefer de façon significative.

1.5.5.2 Différentes types de stators

On trouve deux sortes de machines : avec et sans encoches (figure 1.17). Dans les machines sans encoches, l'entrefer est plus large afin de loger les enroulements; Ce qui nécessite une induction magnétique plus importante. En conséquence les machines sont plus puissantes comparées aux machines avec encoches et présentent plusieurs avantages dont on peut citer :

- absence du couple de détente ou de réluctance; puisque pas de variation de la réluctance durant la rotation.
- bonne commutation puisque l'inductance est petite [23].



1- axe, 2- rotor, 3- aimants, 4- culasse, 5- enroulement d'enter fer,
6- entrefer, 7- encoche

Figure (1.17) : Configuration des moteurs : avec encoche (a) sans encoches (b)

1.5.5.3 Les aimants permanents

Les performances de plus en plus élevées et les avantages que présentent les aimants permanents font que ces derniers sont des éléments de base dans l'industrie moderne. Leurs utilisations dans les machines électriques sont de plus en plus fréquentes. Cependant, les performances des machines utilisant des aimants permanents dépendent des propriétés magnétiques de ceux-ci. Les critères de l'aimant sont à la fois technique et économique [24].

1.5.5.3.a Propriétés générales des aimants

Un aimant permanent est un corps ferromagnétique qui, une fois aimanté, conserve un certain état magnétique et fournit un flux magnétique continu.

La caractéristique de l'aimantation correspond au deuxième quadrant du cycle d'hystérésis du matériau magnétique ($H < 0$, $B > 0$). Cette courbe caractérise l'aimant, on l'appelle également caractéristique principale.

La figure (1.18) représente la courbe de désaimantation (B en fonction de H) pour un aimant NdFeB couramment utilisé dans les machines à aimants permanents de petite puissance.

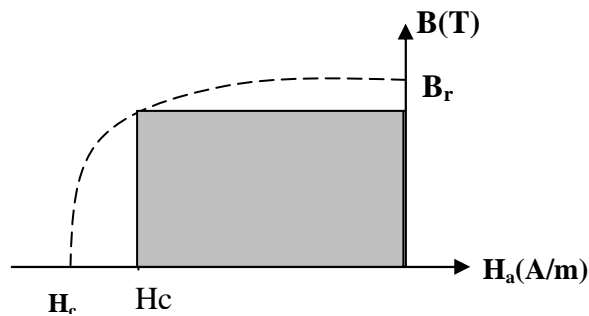


Figure (1.18) : Courbe de désaimantation

Dans un aimant, le champ magnétique est la composition d'un champ de polarisation intrinsèque au matériau magnétique (M) et d'un champ externe (H_m). La courbe intrinsèque donne la polarisation intrinsèque (J). Ces paramètres sont liés par les formules de base :

$$B_m = \mu_0 H_m + J \quad (1.1)$$

$$J = \mu_0 M \quad (1.2)$$

$$B_m = (H_m + M) \quad (1.3)$$

Les points importants de la courbe de désaimantation sont:

B_r *Champ rémanent* : il correspond à la valeur du champ de l'aimant lors d'un court-circuit magnétique.

H_c *Champ coercitif* : valeur de H_m lorsque $B_m = 0$

μ_{rec} *Perméabilité de recul*: correspond à la pente de la courbe $B = f(H)$ au point B_r .

Pour les aimants couramment utilisés dans les moteurs, la caractéristique principale est linéaire. Celle-ci est donc confondue avec les droites de recul.

Une grandeur également importante est le produit (BH) Max ; ce produit est couramment appelé « énergie spécifique de l'aimant ». Cette énergie caractérise la qualité du matériau, car l'énergie spécifique est inversement proportionnelle au volume d'aimant. Donc, pour un entrefer donné, le volume d'aimant est d'autant plus faible que l'énergie spécifique est élevée.

Les matériaux magnétiques peuvent être de deux formes, isotropes ou anisotropes. Les matériaux isotropes ont les mêmes caractéristiques dans toutes les directions, contrairement aux matériaux anisotropes qui ont une direction privilégiée. Les matériaux anisotropes ont de meilleures performances magnétiques dans leur direction privilégiée.

Lorsqu'on utilise des aimants, il faut prendre garde à ne pas les démagnétiser. Si un champ externe trop intense est appliqué à l'aimant, il y a risque de désaimantation. Il faut toujours rester dans la partie linéaire de la courbe principale, afin de garder les performances optimales de l'aimant.

1.5.5.3.b Les différentes familles des aimants

Il existe trois types d'aimants permanents utilisés dans l'excitation des machines ; actuellement ceux qu'on trouve sur le marché sont les Alnicos, les ferrites et les terres rares. La figure (1.19) illustre ces trois types.

- Les aimants ont beaucoup évolué ces cinquante dernières années ; de nouveaux matériaux sont apparus, comme par exemple les terres rares (NdFeB, Sm-Co). Ces nouveaux matériaux ont de très bonnes caractéristiques magnétiques, mais restent relativement coûteux. C'est pourquoi, de nombreuses applications industrielles sont encore réalisées avec des ferrites.

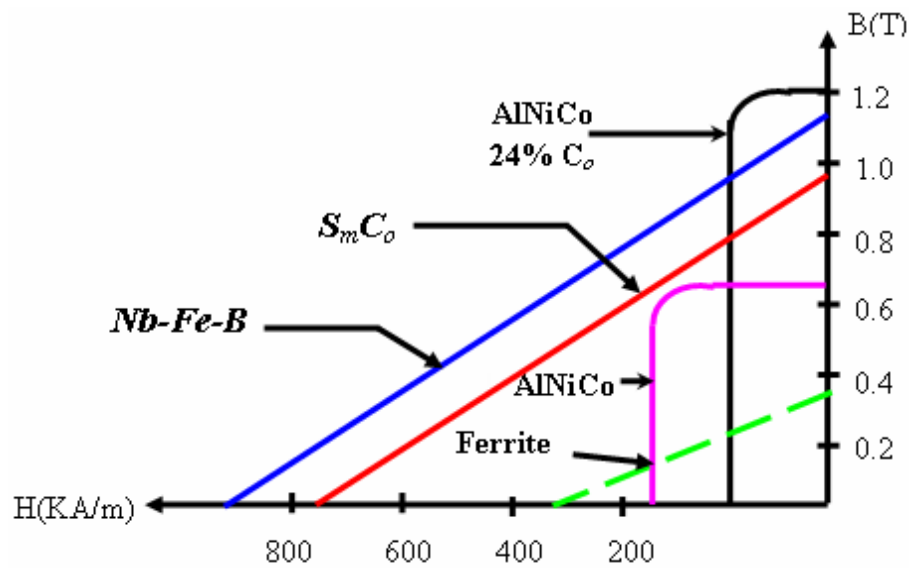


Figure (1.19) : Courbe B (H) des différents types des aimants permanents

- les aimants en *Alinco* ont un champ rémanent très élevé, mais un champ coercitif très faible, ce qui pose de gros problèmes de démagnétisation. Ces aimants ne peuvent être sortis de leur circuit magnétique, sous peine de les désaimanter.
- les aimants en *Ferrite* sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux. Ils résistent bien à la température.
- les aimants *Terre-Rares* (Nd-Fe-B, Sm-Co) sont très puissants et paraissent très bien appropriés pour les machines électriques. Leur coût encore élevé freine l'extension de ces nouveaux aimants. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les plasto-neodymes. C'est un mélange de néodyme fer bore avec un liant plastique. Cette matière permet de réaliser des pièces moulées, ce qui facilite l'assemblage et diminue le nombre de pièces mécaniques.

1.6 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de

stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [25].

1.6.1 Systèmes Hybrides DC pour des Petites Communautés Isolées

La figure (1.20) montre un système de petite puissance DC conventionnel avec une liaison en courant alternatif à travers un onduleur. La majorité de ces systèmes présente une structure où le bus DC de la batterie est le point central de connexion. En général, les petites éoliennes produisent de l'électricité en AC à fréquence variable, laquelle est redressée et appliquée au bus DC. Cette énergie est ensuite stockée ou reconvertie en AC (à amplitude et fréquence fixes) à travers un onduleur pour fournir de l'énergie à la charge.

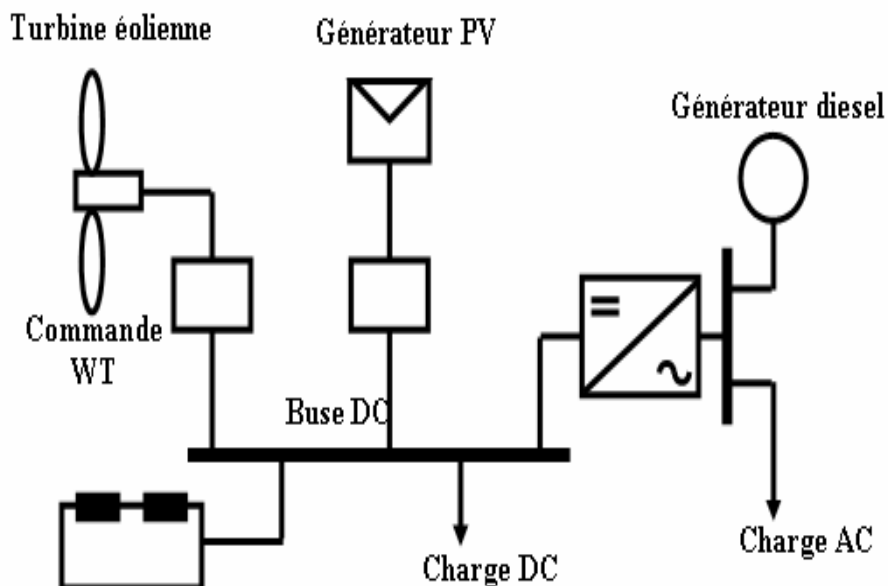


Figure (1.20): Système hybride de puissance avec bus DC avec sources renouvelables et générateur diesel

1.6.2 Systèmes Hybrides AC pour des Petites Communautés Isolées

Dans cette topologie (mini-réseau), les différentes sources de production sont raccordées au bus commun de distribution en courant alternatif avec des onduleurs dédiés (Figure 1.21). De telles structures associent des composants de génération en DC ou en AC. La faisabilité technique et économique de cette structure est liée aux progrès des convertisseurs statiques et de leur commande. L'avantage principal est la modularité qui permet la connexion et/ou le remplacement de modules de production en cas de besoin de plus d'énergie.

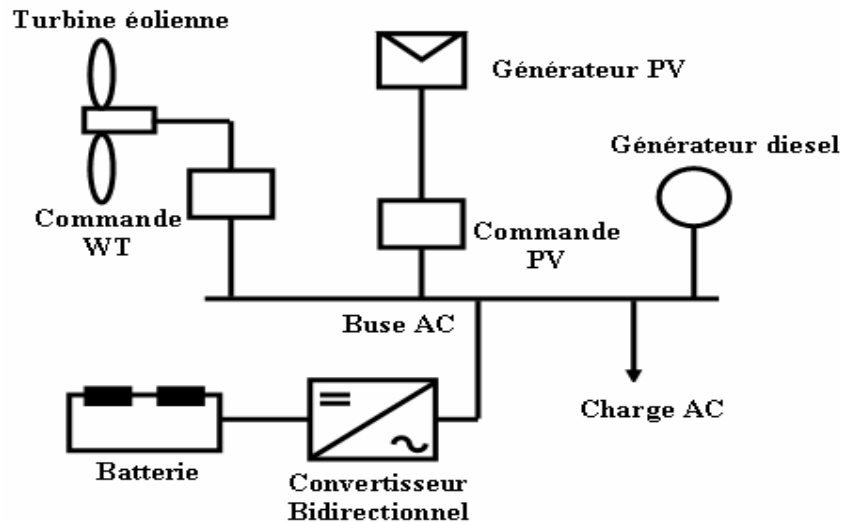


Figure (1.21): Système hybride de puissance avec mini réseau
avec sources renouvelables

1.7 Convertisseurs

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [26].

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le système de conversion des énergies renouvelables, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement: autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctionnements de redresseur et de l'onduleur sont réalisés par un seul appareil. Les hacheurs, le troisième type de convertisseur, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

Il existe trois types d'hacheur:

- hacheur dévolteur (ou série): ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieur à celle de l'entrée V_e .
- hacheur survolteur (ou parallèle): ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieur à celle de l'entrée V_e .
- hacheur série - parallèle: ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieur ou supérieur à celle de l'entrée V_e .

1.8 La charge

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peuvent être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique, ce cas nécessite un onduleur.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des possibilités des énergies renouvelables, en nous focalisant davantage sur les filières éolienne et photovoltaïque et les technologies associées. Nous avons ainsi présenté les différents types de générateurs électriques utilisés dans les turbines éoliennes et les principales applications des éoliennes. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux machines à aimants permanents et aux caractéristiques des aimants constitutifs. Nous avons enfin présenté différentes variantes de convertisseurs utilisés dans les énergies renouvelables.

Chapitre - 2 :

Dimensionnement et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente un modèle de calcul des paramètres des machines synchrones à aimants permanents. Ce modèle basé sur les fonctions analytiques se prêtant bien à ce genre de traitement, nous avons donc naturellement recherché au départ à développer un modèle basé sur leur utilisation. Un modèle analytique a été proposé afin de prédéterminer les caractéristiques géométriques et électriques de la génératrice synchrone à aimants permanents.

Afin de valider la méthode adoptée, la modélisation numérique par éléments finis, permettant la prise en compte des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques ou thermiques, a été utilisée.

2.2 Dimensionnement de la machine synchrone à aimants permanents

2.2.1 Configuration de la machine

Soit une machine synchrone à aimants permanents, constituée de trois phases au stator et des aimants permanents au rotor de type (NdFeB) avec p pair de pôles. La configuration de la machine ainsi que les paramètres géométriques de la machine utilisée lors de la modélisation sont représentés sur la figure (2.1).

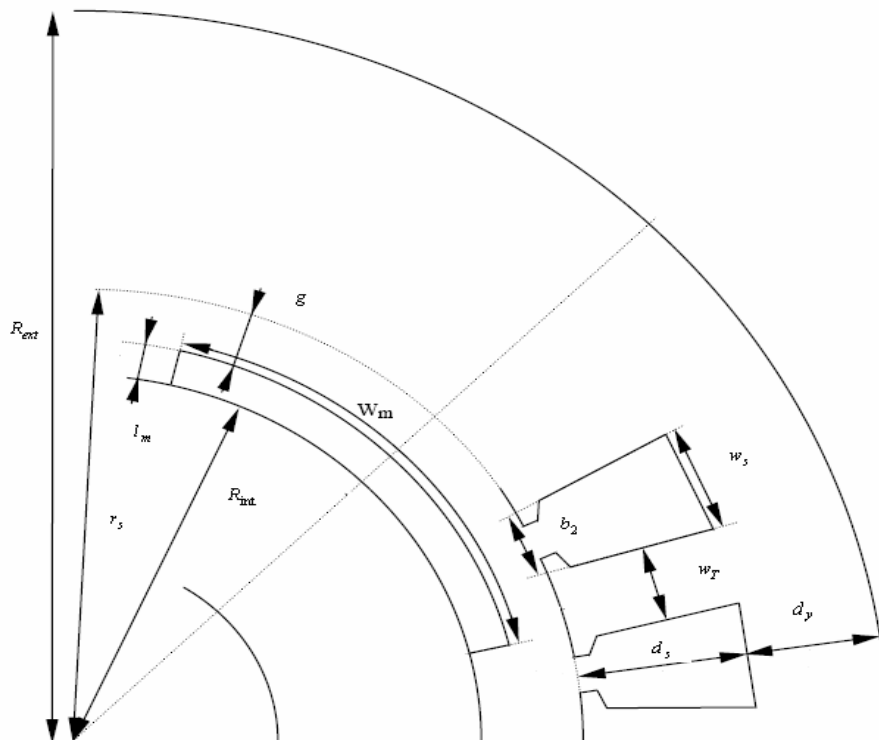


Figure (2.1) : Paramètres géométrique de la machine[27]

2.2.2 Définition des paramètres

Nous allons ici définir les paramètres géométriques de la machine que nous utiliserons lors de la modélisation.

l_m : Epaisseur radiale de l'aimant au rotor.

g : Epaisseur d'entrefer.

w_m : Largeur d'aimant pour un pôle.

w_s : Largeur d'une encoche statorique.

w_T : Largeur d'une dent statorique.

d_s : Profondeur d'encoche.

d_y : Profondeur de la culasse de la machine.

l_r : Longueur active de la machine.

r_s : Rayon d'alésage de la machine.

2.2.3 Démarche de dimensionnement

Le principe du dimensionnement repose donc sur le choix de plusieurs paramètres d'entrée que l'utilisateur modifie à son gré. Nous allons montrer qu'à partir d'un choix judicieux des paramètres d'entrée, les relations analytiques permettent de déterminer toutes les dimensions définissant la machine [28].

2.2.4 Hypothèses de dimensionnement

Ayant effectué les choix initiaux issus de l'analyse du cahier des charges et à partir des propriétés générales des différentes solutions, un module de dimensionnement basé sur un modèle analytique et des équations algébriques a été développé. A partir de l'expression du couple électromagnétique développé par l'interaction du flux des aimants et des courants et en considérant la loi de conservation du flux, il est possible de mettre en relation les grandeurs magnétiques et géométriques de la machine.

Un choix judicieux du vecteur d'entrée permet alors de déterminer toutes les dimensions définissant la machine [29]:

- Nous fixons le facteur de remplissage à $K_p = 0.833$; cette valeur correspond à

$$\alpha_{aimant} = 75^\circ .$$

- La largeur angulaire des aimants est choisie afin de minimiser certains harmoniques de la fem et d'assurer un bon rapport entre le volume d'aimant et la valeur efficace de l'induction dans l'entrefer.
- Nous imposons également la valeur du rapport profondeur d'encoche / rayon d'alésage de sorte que $R_{dr} = 0.25$.
- Le coefficient de bobinage (K_{B1}) dépend du nombre d'encoches par pôle et par phase et du type de bobinage (pas diamétral, pas raccourci...ext.).

$$K_{B1} = \left| \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{N_{ep} \sin \frac{\pi}{6N_{ep}}} \right| \quad (2.1)$$

- Le coefficient de remplissage d'encoche ($K_r = 0.5$) représente le pourcentage de la surface d'encoche occupée par les conducteurs.
- L'aimantation rémanente et la perméabilité relative des aimants dépendent des caractéristiques et de la température des aimants. Dans notre application, nous avons choisi des aimants de type Néodyme Fer Bore ($B_R = 1.1T$, $\mu_r = 1.05$).

- Le rapport rayon d'alésage / longueur active de la machine $R_{rl} = \frac{r_s}{l_r} = \frac{78.3}{97.8} = 0.80$ (2.2)

- Le rapport profondeur d'encoche / rayon d'alésage $R_{dr} = \frac{d_s}{r_s} = 0.25$ (2.3)

Ainsi, le rayon d'alésage est connu et toutes les dimensions de la machine synchrone peuvent être déterminées à l'aide des relations suivantes :

- La longueur active de la machine l_r vaut:

$$l_r = \frac{r_s}{R_{rl}} = 97.8mm \quad (2.4)$$

- Le profondeur des encoches d_s vaut :

$$d_s = R_{dr}r_s = 19.6mm \quad (2.5)$$

- La valeur de l'entrefer est calculée par la relation empirique suivante:

$$g = 0.001 + 0.003\sqrt{r_s l_r} = 1.25mm \quad (2.6)$$

- Le nombre d'encoches au stator N_{enc} se déduit du nombre d'encoches par pôle et par phase

$$N_{ep} : N_{enc} = 6pN_{ep} = 24 . \text{ Avec } N_{ep} = 2$$

Par rapport à ces considérations, nous dégagons huit variables de conception nous paraissant pertinentes pour le modèle de la génératrice électrique : la puissance de dimensionnement P_{dim} (ou puissance au point de base), le rapport rayon sur longueur R_{rl} , le nombre de paires de pôles p , la densité de courant J_s , l'induction dans la culasse B_y , le nombre d'encoches par pôles et par phase N_{ep} , la vitesse ω_{dim} et la tension de dimensionnement V_{dim} .

2.2.5 Les formules du dimensionnement de la machine

Quelques formules analytiques simples permettent d'obtenir un premier dimensionnement de la machine ; ce dernier est certes approximatif mais cependant fiable. Il constitue ainsi le dimensionnement de base de la machine.

Le couple électromagnétique a pour expression :

$$C_{em} = 2\pi r_s^2 l_r B_{1a} K_s K_{B1} \quad (2.7)$$

Avec : $B_{1a}(T)$ la densité de flux dans l'entrefer, $K_s(A/m)$ la valeur efficace de la charge linéique de courant, K_{B1} le coefficient de bobinage.

La valeur efficace de la charge linéique de courant caractérise le courant réparti le long de l'entrefer par unité de longueur. Il s'agit d'une donnée essentielle pour le dimensionnement car elle influe directement sur l'échauffement. L'expression de la charge linéique de courant en fonction des paramètres géométrique et électrique est donnée par :

$$K_s = \frac{J_s w_s d_s}{w_s + w_T} K_{B1} K_r \quad (2.8)$$

Où : $J_s(A/m^2)$ désigne la densité surfacique de courant dans les encoches et K_r le coefficient de remplissage d'encoches.

Pour calculer la densité de flux dans l'entrefer, nous considérons des aimants à aimantation radiale. L'induction créée par un aimant dans l'entrefer est représentée sur la figure (2.2). La valeur de la densité de flux dans l'entrefer B_a est déduite de la valeur de l'aimantation rémanente de l'aimant par la relation [28-30] :

$$B_a = B_R \frac{\frac{l_m}{\mu_r}}{K_c g + \frac{l_m}{\mu_r}} = \frac{4.99}{1.25 + 4.99} = 0.79T \quad (2.9)$$

Avec : K_{cg} l'entrefer corrigé par le coefficient de Carter K_c . Ce dernier prend en compte de manière moyenne les effets des encoches sur la valeur de l'entrefer.

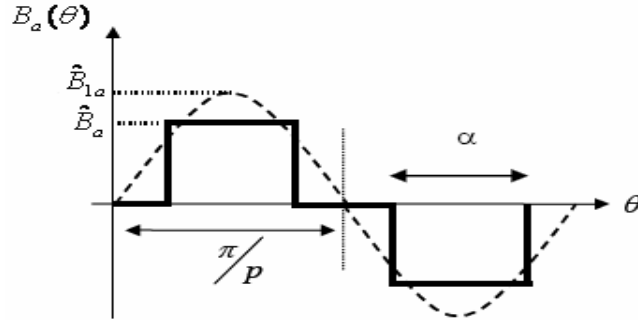


Figure (2.2) : Induction créée par l'aimant dans l'entrefer

Nous pouvons, en première approximation pour les calculs, poser $K_c = 1.05$. La valeur crête du fondamental de l'induction créée par l'aimant dans l'entrefer est définie par la relation :

$$B_{1a} = \frac{4}{\pi} B_a \sin \alpha_{aimant} \quad (2.10)$$

A partir du coefficient de remplissage d'un pôle donné par $K_p = \frac{p\theta_{aimant}}{\pi}$, nous définissons

l'angle α_{aimant} par :

$$\alpha_{aimant} = \frac{\pi}{2} K_p \Rightarrow \alpha_{aimant} = \frac{\theta_{aimant}}{2} \quad (2.11)$$

- La valeur maximale du flux dans la culasse Φ_y vaut la moitié du flux Φ_a produit par les

$$\text{aimants alors : } \Phi_y = \frac{1}{2} \Phi_a. \quad (2.12)$$

La valeur maximale du flux s'obtient par intégration de l'induction sous un pôle :

$$\Phi_a = \int_0^{\alpha} B_a dS = \int_0^{\alpha} B_a l_r r_s d\theta = B_a l_r r_s \alpha. \quad (2.13)$$

De la même manière, l'expression du flux canalisé par la culasse d'épaisseur d_y vaut :

$$\Phi_y = d_y l_r B_y \quad (2.14)$$

Nous pouvons alors exprimer l'épaisseur de la culasse par la relation :

$$d_y = \frac{r_s}{p} \frac{B_a}{B_y} \alpha = 19.27 \text{ mm}. \quad (2.15)$$

- L'épaisseur de l'aimant est donnée par:

$$l_m = K_c \frac{\mu_r}{\frac{B_r}{B_a} - 1} = 5.24mm \quad (2.16)$$

Les largeurs des dents et encoches sont obtenues par l'intermédiaire du rayon d'alésage et nombre d'encoches par pôle et par phase :

$$w_s + w_T = \frac{\pi r_s}{N_{enc}} \quad (2.17)$$

2.2.6 Modèle circuit de la génératrice

Les paramètres électriques de la génératrice sont calculés à partir des paramètres géométriques déterminés précédemment :

- *Inductance magnétisante* L_m d'une phase:

$$L_m = \frac{4\mu_0 l_r r_s}{\pi(K_c g + l_m)} N_{app}^2 K_{B1} N_{ce}^2 \quad (2.18)$$

- *Mutuelle entre phases du stator*: Compte tenu des symétries géométriques du stator, la mutuelle statorique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$M_s = -\frac{L_m}{2} \quad (2.19)$$

- *Inductance de fuites d'une phase* : ce modèle tient compte uniquement des inductances de fuites d'encoche au stator, celles dues aux têtes de bobines sont négligées. Ces inductances de fuites sont calculées analytiquement en considérant une encoche trapézoïdale [31].

$$L_f = 2\mu_0 l_r p N_{app} \lambda N_{ce}^2 \quad (2.20)$$

- *Résistance électrique* R_s d'une phase vaut:

$$R_s = 2\rho_{cuivre} \left[l_r + \frac{\pi(r_s + 0.5d_s)}{2p} \right] \frac{pN_{enc}}{\pi r_s d_s K_r} N_{ce}^2 \quad (2.21)$$

2.2.7 Adaptation du bobinage à la tension d'alimentation

Le dimensionnement, basé sur le couple dimensionnant, détermine le courant total d'encoche. Il doit être complété en calculant le nombre de conducteurs par encoche pour permettre une adaptation en termes de tension et de vitesse. En considérant une machine virtuelle de référence à un seul conducteur par encoches de paramètres L_{m1} (inductance pour un conducteur par encoche), R_{s1} (résistance statorique pour un conducteur par encoche), Φ_{s1} (flux à vide pour un conducteur par encoche), le nombre de conducteurs par encoches

influe sur les caractéristiques électromagnétiques de la machine suivant les relations de similitude :

$$\begin{aligned}
 R_s &= N_{ce}^2 R_{s1} \\
 L_m &= N_{ce}^2 L_{m1} \\
 \Phi_s &= N_{ce}^2 \Phi_{s1} \\
 I_g &= I_{g1} / N_{ce}^2 \\
 L_s &= N_{ce}^2 L_{s1}
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Par hypothèse le courant est sinusoïdal. C'est donc le fondamental de la tension qui intervient dans le calcul de la puissance. L'étude du système se limite alors à celle d'une génératrice triphasée débitant sur une source de tension alternative d'amplitude maximale V_{dim} . Nous verrons dans le chapitre quatre que, cette génératrice débitant sur une batterie d'accumulateur de tension V_{bus} à travers un redresseur commandé, on peut fixer V_{dim} selon:

$$V_{dim} = \frac{V_{bat}}{\sqrt{6}}
 \tag{2.23}$$

Dans notre cas, où le générateur débite sur un redresseur commandé, le courant est en phase avec la tension. Son diagramme de *Fresnel* est donné par la figure (2.3). Les paramètres électriques sont exprimés en fonction du nombre de conducteurs par encoche et des grandeurs de référence établies pour un conducteur par encoche (voire figure (2.3)). On obtient alors le diagramme de Fresnel suivant :

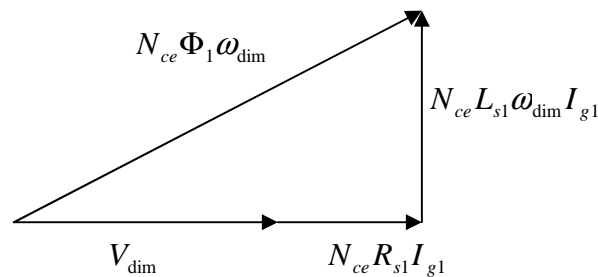


Figure (2.3) : Diagramme de Fresnel au point de base

A partir du diagramme de Fresnel, nous pouvons écrire :

$$(N_{ce} \Phi_{s1} \omega_{dim})^2 = (V_{dim} + N_{ce} R_{s1} I_{g1})^2 + (N_{ce} L_{s1} \omega_{dim} I_{g1})^2 \quad (2.24)$$

En développant, et en réarrangeant les termes, on peut exprimer N_{ce} en fonction du point dimensionnant et des grandeurs pour 1 encoche. L'équation (2.24) devient ainsi :

$$N_{ce}^2 - \frac{2V_{dim} R_{s1} I_{g1}}{(\Phi_{s1} \omega_{dim})^2 - [R_{s1}^2 + (L_{s1} \omega_{dim})^2] I_{g1}^2} N_{ce} - \frac{V_{dim}^2}{(\Phi_{s1} \omega_{dim})^2 - [R_{s1}^2 + (L_{s1} \omega_{dim})^2] I_{g1}^2} = 0 \quad (2.25)$$

Dans le cas où Δ est positif, l'équation (2.25) admet une solution positive :

$$N_{ce} = \sqrt{b^2 - c} - b \quad (2.26)$$

Ainsi, en connaissant le nombre de conducteurs par encoche N_{ce} nous pouvons déduire les valeurs de L_m, R_s et Φ_s .

2.2.8 Champ produit par les courants statoriques

Comme la réaction du champ magnétique dans ce type de machines ne dépasse pas 5% à 10% de la valeur du champ magnétique produite par les aimants, on prend la perméabilité des aimants égale à l'unité [27]. Assumer que le courant du stator produit un champ magnétique sinusoïdal, sa valeur maximale $\hat{B}_{g,bob}$ dans l'entrefer est:

$$\hat{B}_{g,bob} = \mu_0 \hat{H} = \mu_0 \frac{N \hat{I}}{g_1 + \frac{l_m}{\mu_r}} = N_{ep} n_s K_{B1} \hat{I} \frac{3\mu_0}{\pi \left(g_1 + \frac{l_m}{\mu_r} \right)} \quad (2.27)$$

Où : N est le nombre de tours par phase

$$N = \frac{p}{2} N_{ep} n_s K_{B1}. \quad (2.28)$$

La perméabilité relative du fer est supposée infinie. L'équation (2.27) prouve que la réaction d'armature diminue quand la largeur d'entrefer g_1 augmente. Le flux additionnel $\Phi_{p,bob}$ par pôle qui est produit par le courant des bobines statoriques peut être calculé comme

$$\text{suit : } \Phi_{p,bob} = \frac{2}{p} \hat{B}_{g,bob} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) r_s l \quad (2.29)$$

2.3 Détermination des grandeurs caractéristiques de la machine.

La connaissance du champ est suffisante pour déterminer les grandeurs caractéristiques de la machine, à savoir, la fem, la puissance et le couple électromagnétique.

2.3.1 Calcul de la fem induite

Pour le calcul de la fem maximale induite dans les enroulements statoriques, on a besoin de la valeur maximale de la dérivée du flux magnétique [32].

$$\hat{E} = \max\left[\frac{d\Psi_m}{dt}\right] = N \max\left[\frac{d\Phi_m}{dt}\right] \quad (2.30)$$

Φ_m : Fondamental du flux magnétique donné par :

$$\Phi_m = \hat{\Phi}_m \sin(\omega_{el}t) = \hat{B}_g l \frac{r_s \pi}{p} \frac{2}{\pi} \sin(\omega_{el}t) \quad (2.31)$$

La vitesse angulaire électrique ω_{el} est couplée à la fréquence électrique et à la vitesse angulaire mécanique selon la relation suivante:

$$\omega_{el} = 2\pi f = \Omega \frac{p}{2} \quad (2.32)$$

Donc la fem \hat{E} peut être calculée ainsi:

$$\hat{E} = N_{ep} n_s K_{B1} \omega_{el} \hat{B}_g l r_s \quad (2.33)$$

2.3.2 Puissances

Cette section expose la détermination des différentes puissances à partir de la tension induite de mouvement de phase en tenant compte des pertes issues de la machine (pertes Joule et pertes fer). Avant de présenter les différentes composantes de la chaîne énergétique, il est intéressant d'établir le bilan de puissance sous forme graphique (2.4) avec l'utilisation des paramètres suivants : P_{elec} la puissance électrique, P_{mec} puissance mécanique, P_f les pertes fer, P_j les pertes joule et P_{frot} les pertes frottements [33].

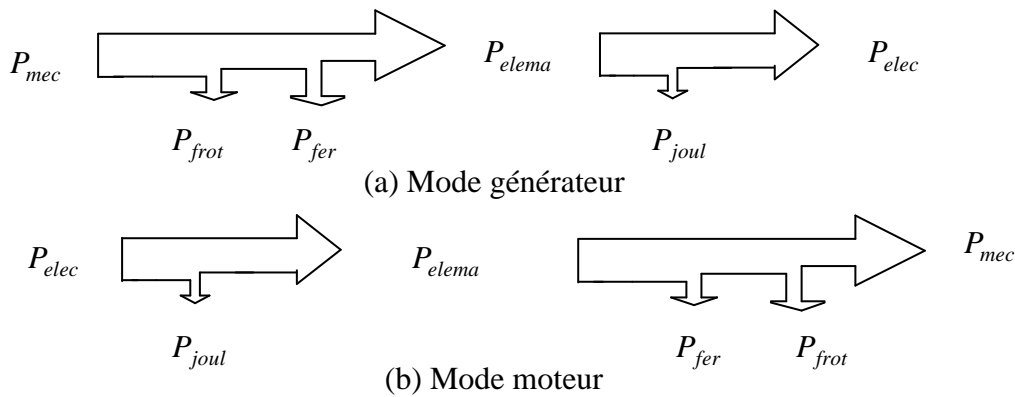


Figure (2.4): Bilan de puissance

A partir de la puissance électromagnétique, on peut déduire la puissance mécanique P_{mec} et la puissance électrique P_{el} consommée selon le bilan de puissance défini à la figure (2.4) :

$$P_{mec} = P_{elma} - P_{fer} - P_{frot} \quad (2.34)$$

$$P_{el} = P_{elma} + P_{joul} \quad (2.35)$$

2.3.4 Calcul des pertes

Lors du calcul des pertes des machines électriques, il convient d'évaluer les pertes afin de réaliser un bon dimensionnement et surtout d'établir une bonne évaluation du rendement. Le détail des pertes est présenté dans le tableau (2.1).

Pertes totales	Pertes cuivres (P_{cu})	Dans les enroulements
	Pertes fer (P_{fer})	Par hystérésis
		Par courants de Foucault
Pertes supplémentaire (P_{frot})	Par frottements	

Tableau (2.1) : Pertes de la machine

2.3.4.1 Les pertes cuivre

Dans une machine synchrone à aimants permanents, les pertes Joule liées au courant d'alimentation sont génératrices d'échauffements concentrés au niveau du stator, particulièrement dans les bobinages. Pour une machine possédant m phases, les pertes par effet Joule P_J s'expriment par [30] :

$$P_J = mR_{ph} I_{ph}^2 \quad (2.36)$$

Avec :

$$R_{ph} = \frac{N_{ph} \rho Lc}{S_{\omega}} \quad (2.37)$$

N_{ph} est le nombre de spires par phase, S_{ω} la surface du conducteur, ρ la résistivité et L_c la longueur totale.

$$Lc = l_r + \frac{\pi}{2p} R_{\omega} \quad (2.38)$$

Où R_{ω} est le rayon moyen au niveau d'enroulement.

2.3.4.2 Les pertes fer

Les pertes de fer sont dues aux pertes par courants de Foucault et par hystérésis magnétique dans les matériaux en fer. Les pertes fer au rotor sont habituellement négligées tandis que les pertes de fer dans les dents et la culasse du stator produisent la partie principale de toutes les pertes fer [33].

Les pertes fer sont généralement exprimées sous la forme suivante, pour une densité de flux magnétique B sinusoïdale avec la fréquence angulaire :

$$P_F = P_{F_s, ds} + P_{F_s, cs} \quad (2.39)$$

Avec : $P_{F_s, ds}$ qui concerne les pertes fer dans les dents statoriques :

$$P_{F_s, ds} = C_{pFe} \left(\frac{f}{50} \right)^{kFe} \hat{B}_{ds}^2$$

Avec : $P_{F_s, cs}$ qui concerne les pertes fer dans la culasse statorique :

$$P_{F_s, cs} = C_{pFe} \left(\frac{f}{50} \right)^{kFe} \hat{B}_{cs}^2 \quad (2.40)$$

Où C_{pFe} et k_{Fe} correspondent respectivement au chiffre de pertes fer et à l'exposant de pertes fer. Pratiquement, ces deux paramètres sont réglés afin d'approcher au mieux les valeurs de pertes fer spécifiques données par les fournisseurs de matériaux ferromagnétiques doux.

2.3.4.3 Les pertes supplémentaires

Ce sont toutes les pertes qu'on ne peut pas calculer ou estimer, mais qui existent.

2.3.5 Le rendement

Le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{mec} + \Delta P} \quad (2.41)$$

$$\Delta P = P_{fer} + P_{Joul} + P_{sup} \quad (2.42)$$

2.4 Résultats obtenus par les formules analytiques du dimensionnement

Ces résultats correspondent à une solution envisageable pour la machine

Variables de conception	
Rapport rayon / longueur R_{rl}	0.80
Induction dans la culasse $B_y(T)$	1.20

Nombre de paires de pôles p	2
Densité de courant $J_s (A/mm^2)$	3.19
Tension de dimensionnement $V_{dim} (V)$	90
Puissance de dimensionnement $P_{dim} (W)$	600
Nombre d'encoche par pôle/phase N_{ep}	2
Vitesse de dimensionnement $\Omega_{dim} (rad/s)$	157
Paramètres géométriques	
Nombre de phases	3
Nombre de conducteurs	326
Section du conducteur (mm^2)	0.632
Nombre d'encoches par pole/phase	2
Nombre d'encoches stator	24
Nombre spires totales	163
Coefficient de bobinage K_b	0.957
Coefficient de remplissage K_r	0.5
Coefficient de carter K_c	1
Coefficient de remplissage des pôles K_p	0.833
Entrefer $g(mm)$	1.2
Rayon d'alésage $r_s(mm)$	78.3
Longueur active $l_r(mm)$	107.8
Epaisseur de la culasse $d_y(mm)$	20.9
Rayon extérieur du rotor $R_{ext}(mm)$	71.7
Rayon intérieur du rotor $R_{int}(mm)$	68.4
Epaisseur du rotor $d_r(mm)$	3.5
Epaisseur de l'aimant $l_m(mm)$	5.3
Largeur de l'aimant $w_m(mm)$	90
Largeur d'encoche (mm)	2.3
Hauteur d'encoche $d_s(mm)$	16.5

Surface d'encoche utile (mm^2)	19
Paramètres magnétiques	
Champ coercitif ($A.m$)	$8.34*10exp5$
Induction rémanente $B_R(T)$	1.1
Induction dans la culasse $B_y(T)$	1.2
Flux (Wb)	2.09
Induction dans l'entrefer $B_a(T)$	1.07

2.5 La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est devenue un outil très répandu. Elle consiste à chercher une solution approchée à partir d'une discrétisation du domaine d'étude sur les équations de Maxwell résolues. Ces équations sont regroupées en trois groupes [34]:

- Les équations de couplage

$$R\vec{\text{rot}}\vec{E} = \frac{\delta B}{\delta t} \quad (2.43)$$

$$R\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\delta \vec{E}}{\delta E} \quad (2.44)$$

- Les équations de conservation

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.45)$$

$$\text{div}\vec{j} = 0 \quad (2.46)$$

$$\text{div}\vec{D} = 0 \quad (2.47)$$

- Les équations de propriétés des matériaux

$$B = \mu H + B_r \quad (2.48)$$

$$\vec{j} = \nabla \vec{E} \quad (2.49)$$

$$f = \delta E + f_0 \quad (2.50)$$

À partir de l'équation (2.45), on peut exprimer le champ électromagnétique en fonction du potentiel vecteur magnétique \vec{A} :

$$\vec{B} = R\vec{\text{rot}}\vec{A} \quad (2.51)$$

Pour garantir l'unicité de A , selon la jauge de Coulomb, on pose: $R\vec{\text{rot}}\vec{A} = 0$ (2.52)

La méthode utilisée est pour résoudre le problème en potentiel vecteur. Le système étudié est décomposé en petits éléments, chaque élément étant constitué d'un certain nombre de nœuds. Le système est résolu aux nœuds du maillage.

L'application de la méthode des éléments finis pour le calcul du champ magnétique dans l'entrefer et sa distribution à différentes parties de la machine, basé sur la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot} (\text{rot} \vec{A}) + j\omega\chi \vec{A} = \vec{j}_c \quad (2. 53)$$

Où : μ la perméabilité, ω_s la vitesse angulaire, χ la conductivité, \vec{A} le potentiel magnétique vecteur et \vec{j}_c la densité du courant vecteur

L'équation décrivant le problème en magnétostatique au ($\omega_s = 0$) est donnée par :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot} (\text{rot} \vec{A}) = \vec{j}_c \quad (2. 54)$$

La condition de Dirichlet indique la valeur du potentiel vecteur ($A = 0$) sur la frontière ; la condition de Neumann indique la valeur de la composante normale $n(\frac{1}{\mu} \nabla A)$ sur la frontière.

2.5.1 Logiciel de résolution

Les logiciels éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [35]:

- introduction des données géométriques et des propriétés physiques ;
- maillage ;
- résolution ;
- exploitation des résultats ;

Sont séquentiellement exécutées.

Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

Toutefois, en utilisant une méthode des Eléments Finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes.

C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux-2D que nous allons présenter dans ce qui va suivre.

2.5.2 Structure de FLUX 2D

Ce logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés:

2.4.2.1 Module pré processeur

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

2.5.2.2 Module processeur

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

2.5.2.3 Module post-processeur (PostPro_2D)

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des

grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (2.5).

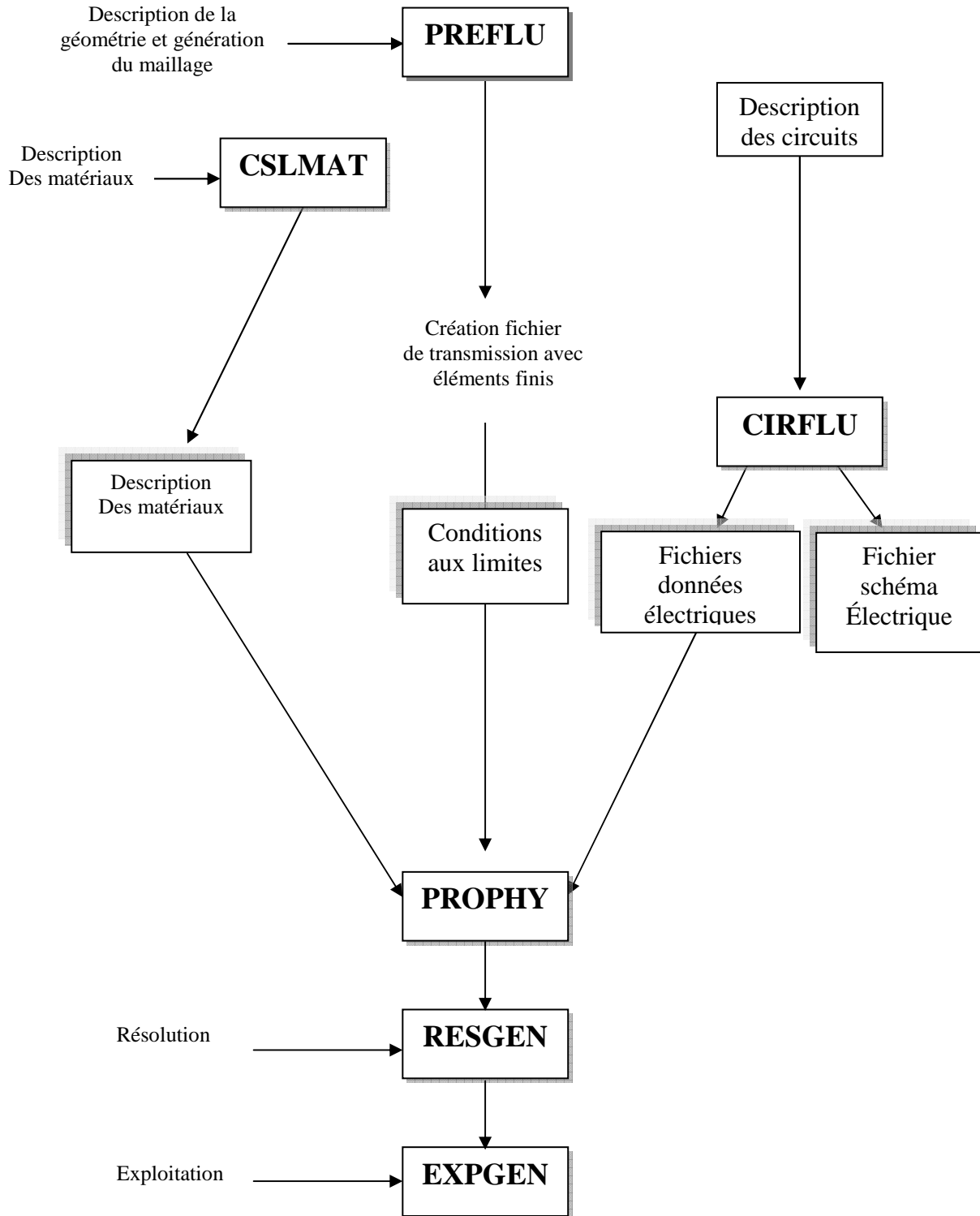


Figure (2.5) : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D

- **Propriétés physiques**

L'analyse éléments finis est effectuée en *non linéaire*. Les parties ferromagnétiques sont représentées par la caractéristique $B(H)$ des tôles utilisées (Fig. 2.6).

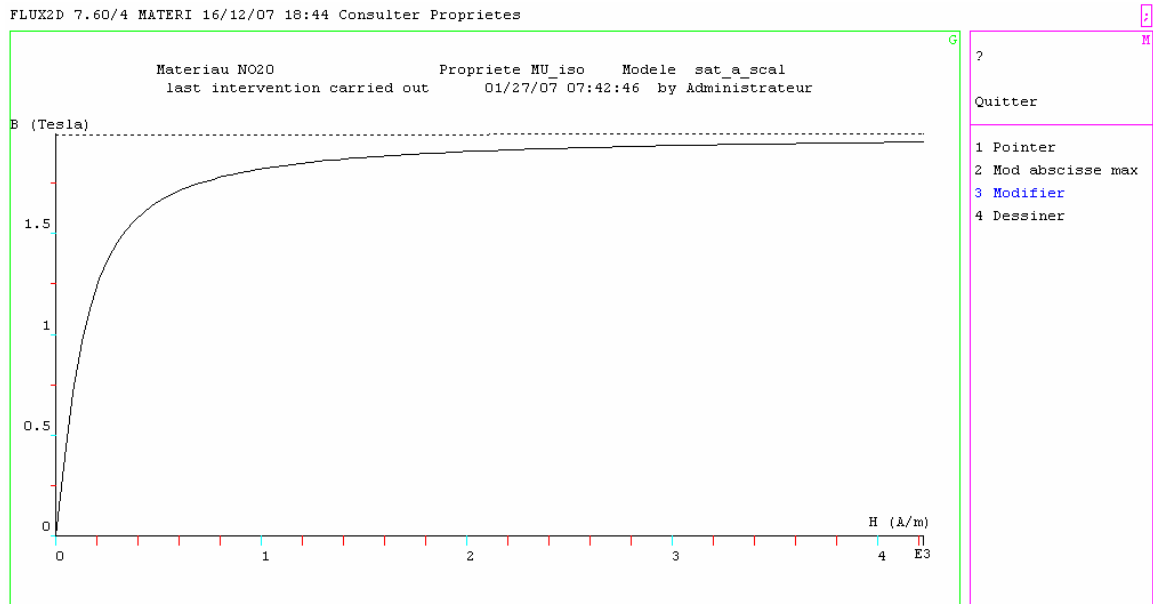


Figure (2.6) : Caractéristique magnétique $B(H)$ du matériau

Afin de tenir compte de l'aimantation radiale des aimants, des modifications sont introduites, au sien du logiciel. Le programme de calcul permet une prise en compte rigoureuse de l'aimantation radiale dans les aimants.

La figure (2.7) représente deux types d'aimantation possibles; une aimantation parallèle et une aimantation radiale.

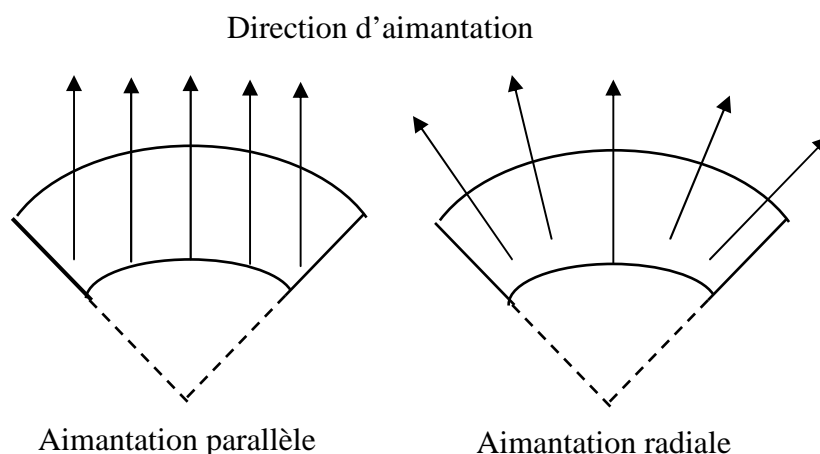


Figure (2.7) : Types d'aimantation

L'aimantation parallèle a une direction fixe et l'aimantation radiale a des directions d'aimantation convergente toutes vers le centre. Chaque élément du maillage appartenant à

l'aimant possède sa propre direction. Cette direction est calculée par rapport au centre du modèle géométrique.

Les simulations ont été réalisées en 2D axisymétrique par le logiciel de calcul par élément fini Flux-2D version (7.6). Dans toutes les simulations réalisées on a modélisé, pour des raisons de symétrie, le quart de la machine. La géométrie de la machine synchrone à aimants permanents est représentée figure (2.8).

Nous avons utilisé un maillage de 9788 éléments et de 19677 noeuds comme illustré sur la figure (2.9). La taille de grille des mailles autour de l'entrefer doit être plus petite que les autres régions adjacentes (Figure (2.10)), qui permettent une plus grande précision des résultats, où on s'attend à un degré élevé de 98.9 % d'éléments de bonne qualité.

La notion de « *bande de roulement* » permet de modéliser avantageusement l'entrefer, siège des échanges électromagnétiques entre stator et rotor. Les conditions aux limites de type Dirichlet ($A=0$) sont appliquées sur les frontières représentées sur la figure (2.11). Les figures (2.12), (2.13), (2.14) illustrent respectivement : les lignes de flux, la densité de flux, la carte d'induction. Un résultat typique de cette machine est l'induction magnétique dans l'entre fer et dans les culasses stator et rotor représentées sur les figures (2.15), (2.16).

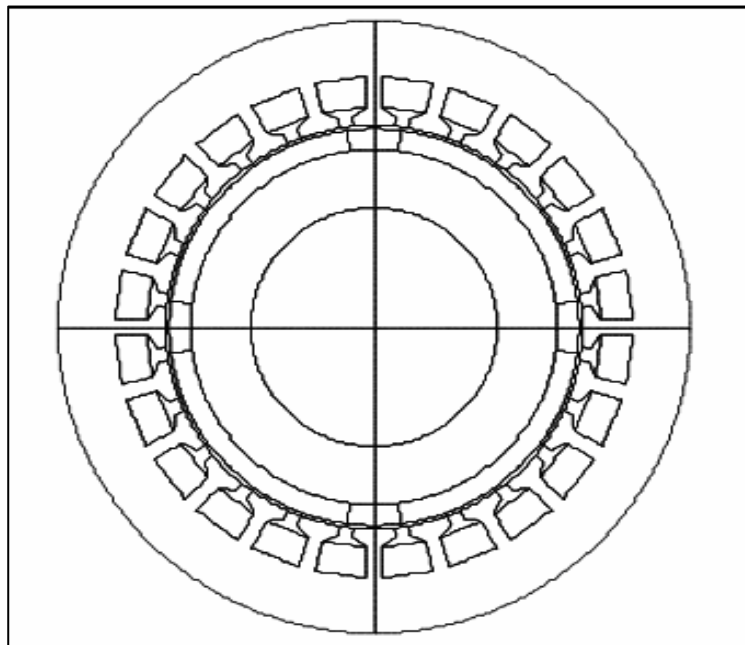


Figure (2.8) : Coupe transversale de la MSAP

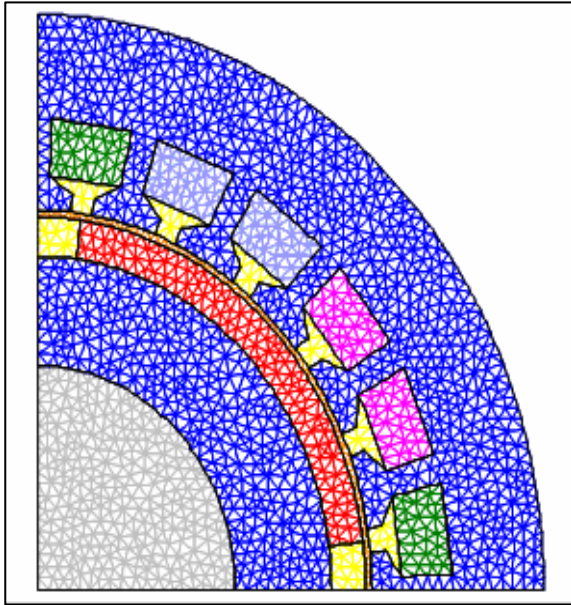


Figure (2.9) : Maillage du domaine d'étude

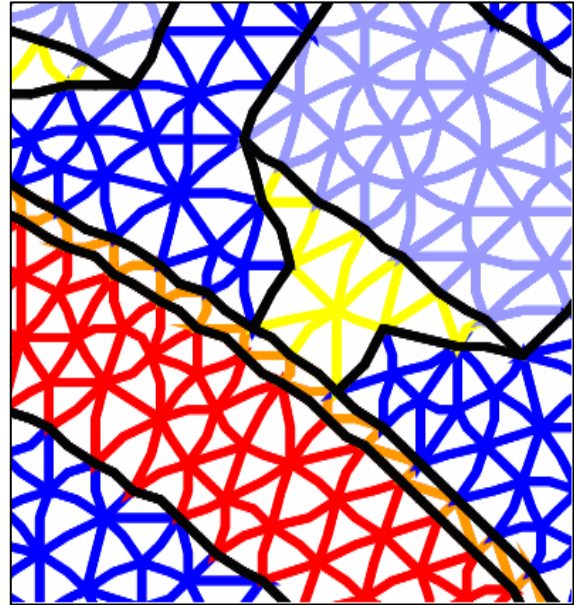


Figure (2.10) : Maillage dans l'entrefer

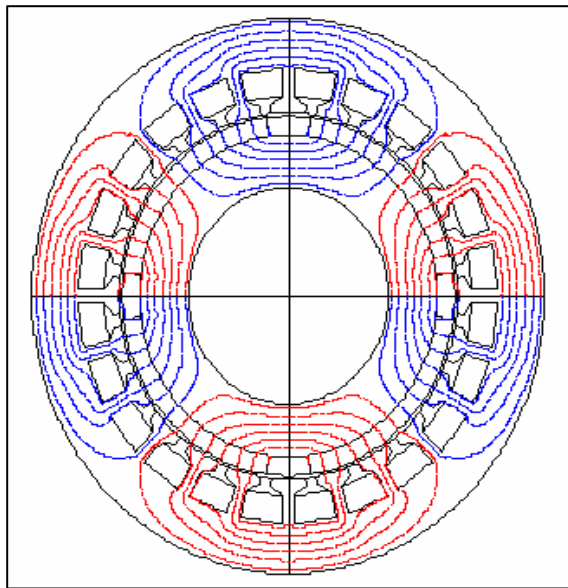


Figure (2.11) : Ligne iso-valeurs

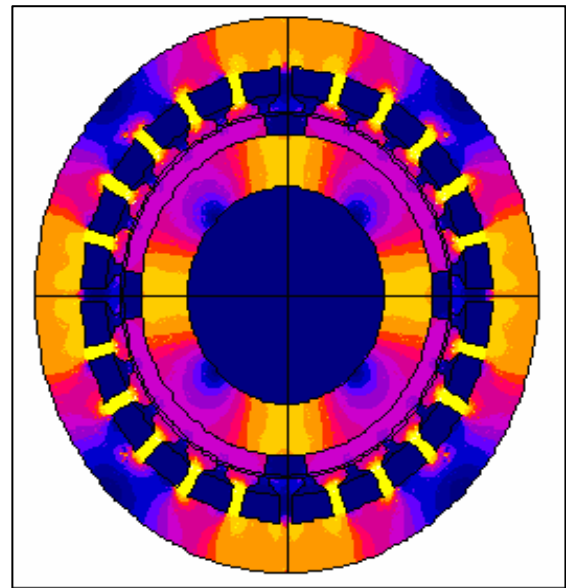


Figure (2.12) : Dégradé de l'induction

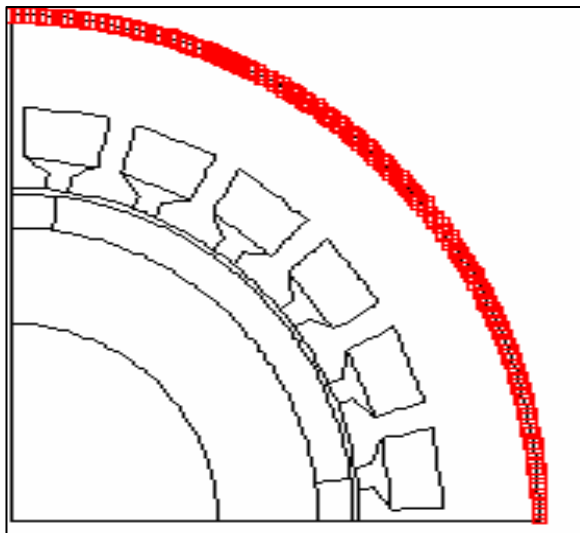


Figure (2.13) : Conditions aux limites appliquées

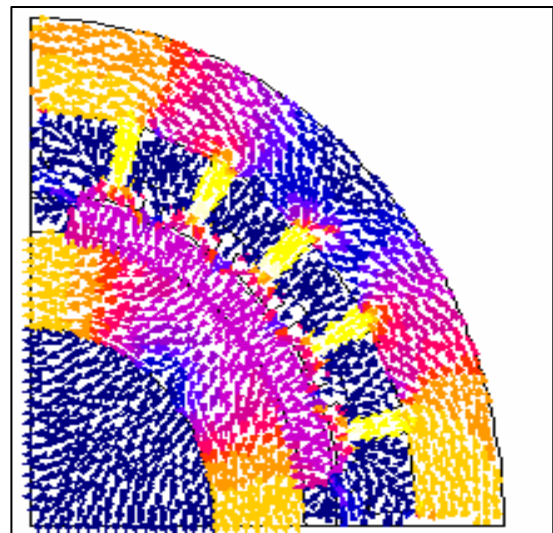


Figure (2.14) : La densité de flux

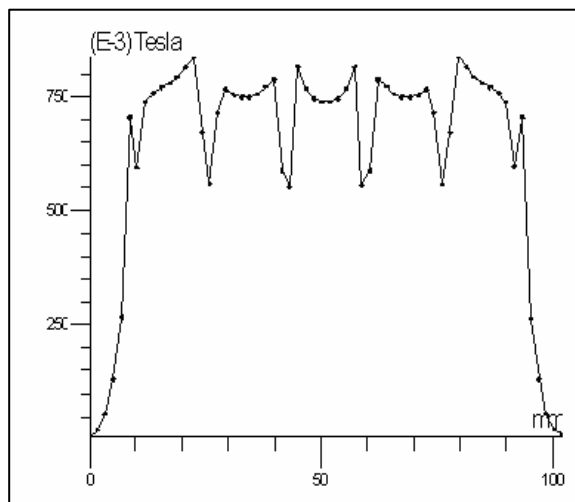


Figure (2.15) : L'induction dans l'entrefer

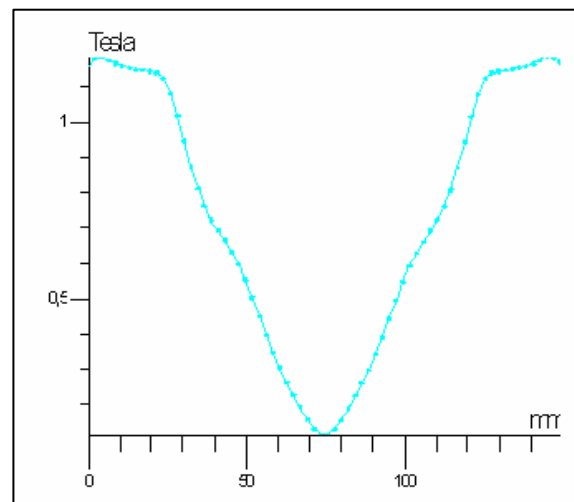


Figure (2.16) : L'induction dans la culasse

2.6 Validation par calcul du champ de la machine

Afin de valider le modèle analytique de dimensionnement, nous comparons les valeurs analytiques des inductions de la machine de référence, avec celles obtenues par la méthode des éléments finis.

	Analytique	FEM
Induction dans l'entrefer	0.79	0.76
Induction au centre des aimants	1.1	1.02
Induction dans culasse stator et rotor	1.2	1.12

L'erreur maximale sur les inductions est de l'ordre 5%. Ceci n'est pas vraiment une surprise vue la « finesse » d'une approche par éléments finis par rapport à une approche analytique.

2.7 Conclusion

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents est réalisée en utilisant deux niveaux de calcul successifs et progressifs. D'abord un dimensionnement de base est réalisé en utilisant les formules analytiques classiques du dimensionnement. Cette première approche, qui inclut déjà une estimation des pertes fer et Joule est déjà relativement fiable mais nécessite cependant d'être précisée. Le calcul numérique, en utilisant la méthode des éléments finis (logiciel éléments finis Flux 2D), est parfaitement adapté à la résolution des problèmes de conception fine pour valider la méthode adoptée.

Chapitre - 3 :

Modélisation et commande du système de conversion photovoltaïque

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque puis décrirons les modèles mathématiques des composants du système. Comme la chaîne de conversion éolienne, le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme représenté dans la figure (3.1) :

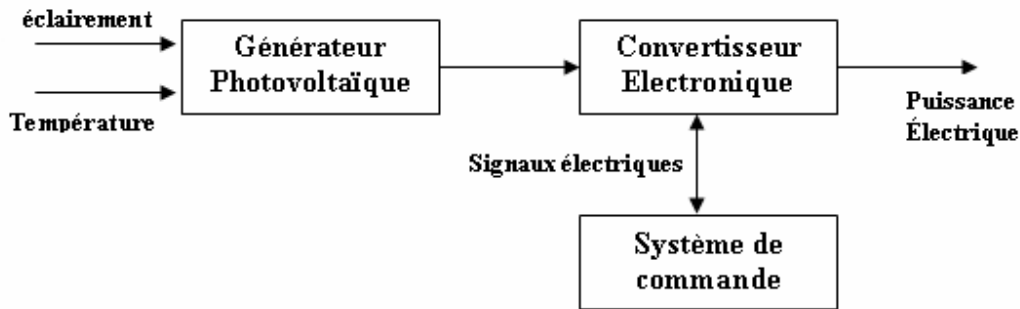


Figure (3.1) : Système de conversion photovoltaïque

Ainsi, la modélisation du système de conversion photovoltaïque suppose la modélisation du générateur photovoltaïque (la cellule PV, les panneaux et leurs connections) et de l'ensemble hacheur système de commande et, pour finir, étudier le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (*MPPT*).

3.2.1 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs [39].

3.2.2 Le semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du «bande gap», E_g en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin ($c-Si$), et 1.7 eV pour le silicium amorphe ($a-Si$).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule [39].

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il faut introduire un champ électrique e , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du 'dopage' par des impuretés. Deux types de dopage sont possibles :

- Le dopage de type n (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrices des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n , on augmente fortement la concentration en électrons libres.

- Le dopage de type P (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type P le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type P) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libre (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs.

Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie du bande gap augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée [39].

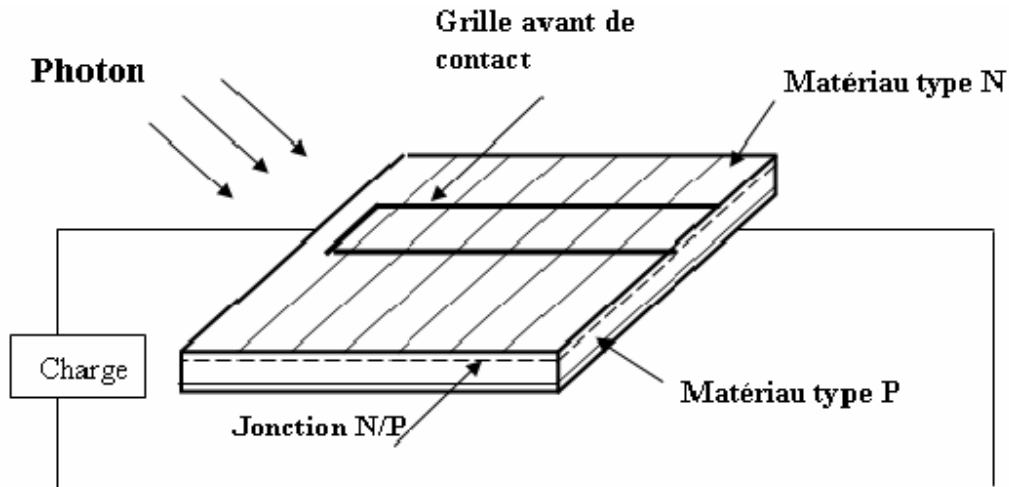


Figure (3.2) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV [40]

3. 2.3 Modèle d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme le montre la figure (3.3).

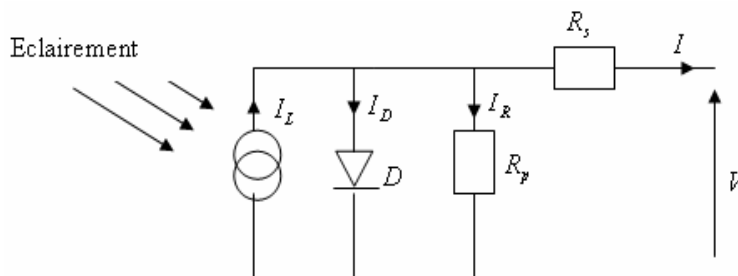


Figure (3.3) : Circuit équivalent de la cellule solaire

La cellule comporte une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

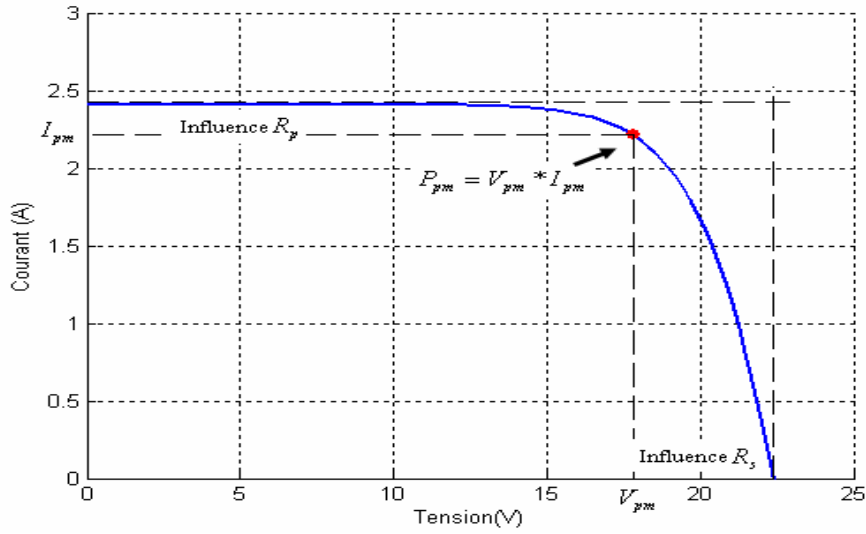


Figure (3.4) : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d’une cellule photovoltaïque

3. 2.4 Présentation du modèle mathématique

A partir de la figure (3.3) la loi des noeuds nous permet d’écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \tag{3.1}$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) \tag{3.2}$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_R = \frac{V + IR_s}{R_p} \tag{3.3}$$

A partir de l’équation (3.1), on obtient l’expression de courant I :

$$I = I_L - I_D - I_R \tag{3.4}$$

Remplaçons dans (3.4) les équations (3.2) et (3.3) l’équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \tag{3.5}$$

Où :

I : Le courant de cellule.

V : La tension de cellule.

R_s : La résistance série de la cellule. [Ω]

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19} \text{C}$.

I_0 : Le courant de saturation [A]

K : La constante de Boltzman ($1.3854 * 10^{-2} \text{JK}^{-1}$).

V_g : La tension de seuil de diode (1.1V).

n : Le facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (3.5) devienne:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V + R_s I)}{nKT}} - 1 \right) \quad (3.6)$$

L'équation (3.6) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquées.

3. 2.5 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [43] :

- Courant de court circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo courant

I_L dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (3.2), on obtient:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{nKT}} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (3.7)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le

terme $I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{nKT}} - 1 \right)$ devant I_L .

L'expression approchée du courant de court circuit est alors : $I_{cc} = \frac{I_L}{(1 + \frac{R_s}{R_p})}$

- Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV_{co}}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (3.8)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = \left(\frac{q}{nKT} \right) * \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.9)$$

- Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF , le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{pm} * I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} * V_{co}$.

Où : I_{cc} intensité de court-circuit et V_{co} tension de circuit ouvert

$$FF = \frac{I_{pm} V_{pm}}{I_{cc} V_{co}} \quad (3.10)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

- Le rendement

Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (3.11)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert [39].

3. 2.6 Influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V)

Le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel au flux lumineux (E); par contre, pour la tension (V) aux bornes de la jonction $N-P$ du matériau lui-même, sa dépendance est minimale. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ;
- Les points de puissance maximale se situent presque à la même tension.

La température a un effet très important sur la tension de circuit ouvert et un effet non remarquable sur le courant de court circuit de la cellule (voir figure (3.5)). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ $0.025mA/cm^2/^\circ C$ alors que la tension décroît de $2.2mV/^\circ C$ cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0.4\%/^\circ C$. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque [38-40].

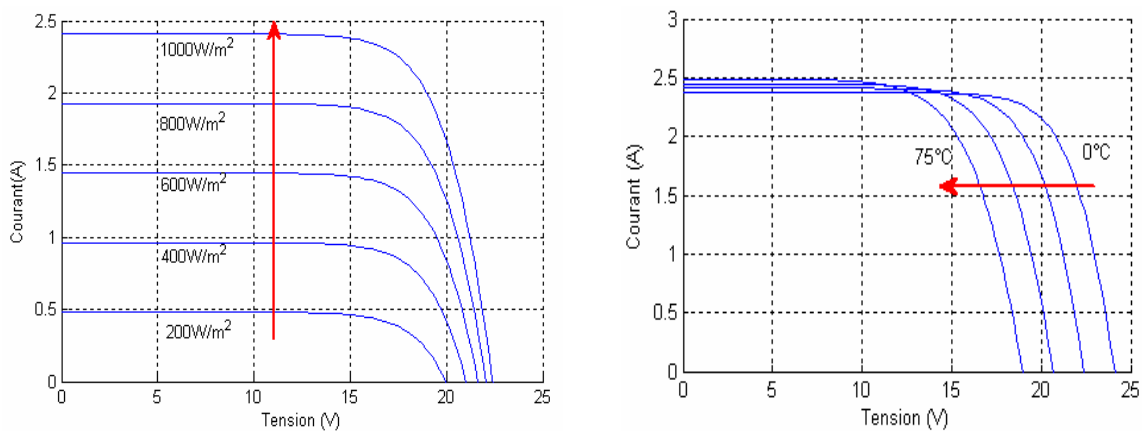


Figure (3.5): Influence de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques $I - V$ du module photovoltaïque

3.3 Les modules photovoltaïques

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge et les modules auront donc généralement 36 cellules. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série, si en additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [38].

Pour notre présente étude, on a choisi le module photovoltaïque du type **AEGPQ-40** dont les caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant [40].

Spécifications du module solaire AEG PQ10/40/01-02	
Température (T_{ref})	25 °C
Eclairement (E_{ref})	1000 W/m ²
Tension du circuit ouvert (V_{OC})	22.4 V
Courant du court circuit (I_{SC})	2.41 A
Tension du point de puissance maximale (V_m)	17.45 V
Courant du point de puissance maximale (I_m)	2.2 A
Puissance maximale (P_m)	38 W

3.4 Les générateurs PV

Les modules *PV* sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules *PV*. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu (figure 3.6).

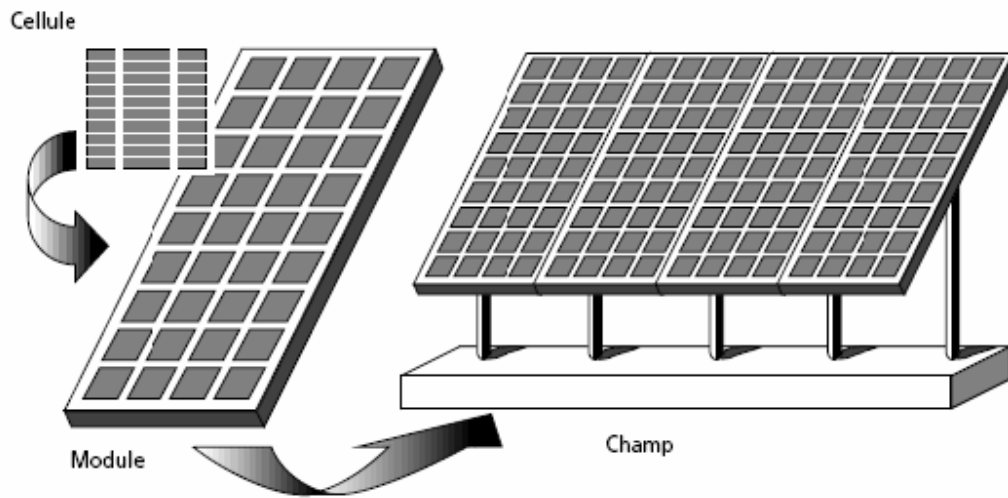


Figure (3.6): Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques [38]

Pour le générateur, la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ est obtenue par :

$$I_{pv} = N_p I \quad (3.12)$$

$$V_{pv} = N_s V \quad (3.13)$$

Où : N_p est le nombre de modules en parallèles et N_s le nombre de modules en séries.

3.5 Résultats et Interprétations

Les résultats de la simulation du générateur photovoltaïque sont représentés par les figures (3.7-8) :

- La figure (3.7.a) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.
- La figure (3.7.b) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température

influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

- La figure (3.8 a) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ et l'influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ du générateur illustre sur la figure (3.8.b).

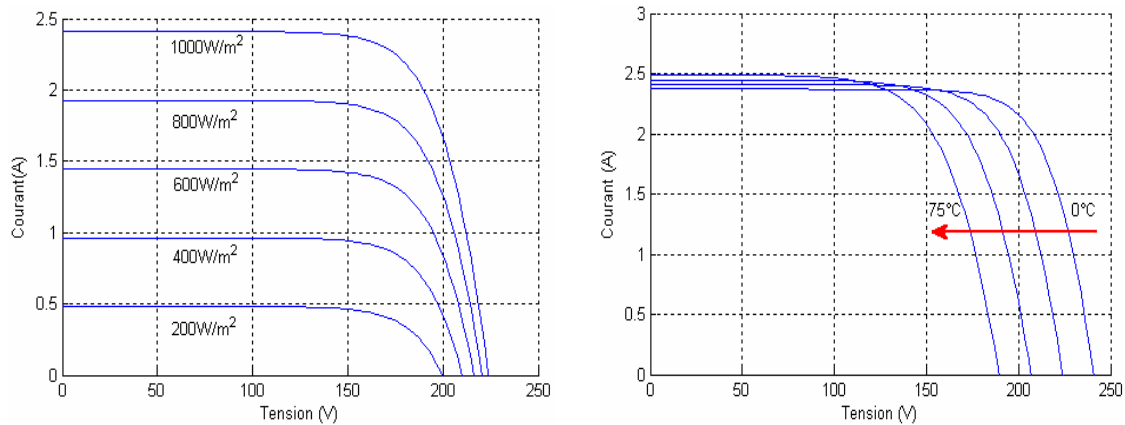


Figure (3.7) : La caractéristique $I(V)$ du GPV (effet (a) éclairement (b) température)

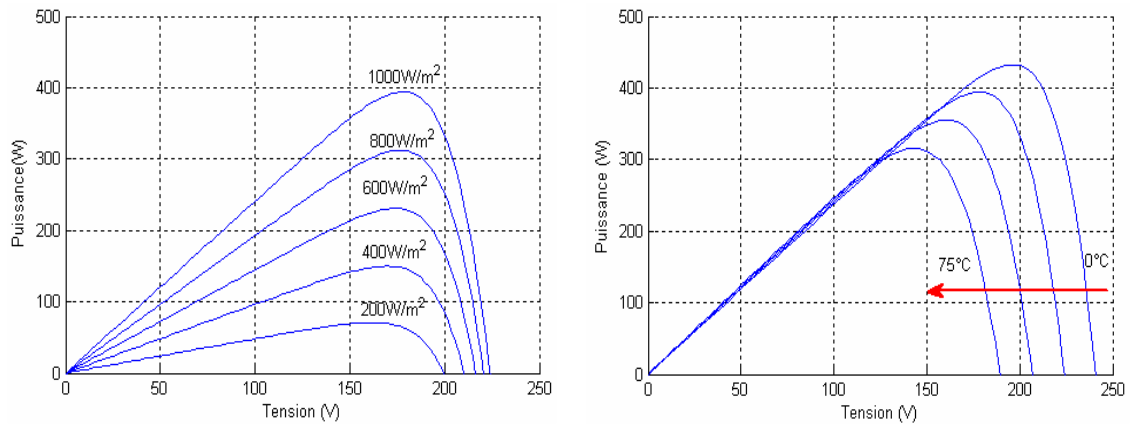


Figure (3.8) : La caractéristique $P(V)$ du GPV (effet (a) éclairement (b) température)

3.6 Principe de la recherche du point de puissance maximal

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est assez difficile. En effet, côté source pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement

en fonction de l'éclairement, de la température. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions données, c'est-à-dire au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension représentée à la figure (3.9) à éclairement $800 W/m^2$ et la température $25^\circ C$.

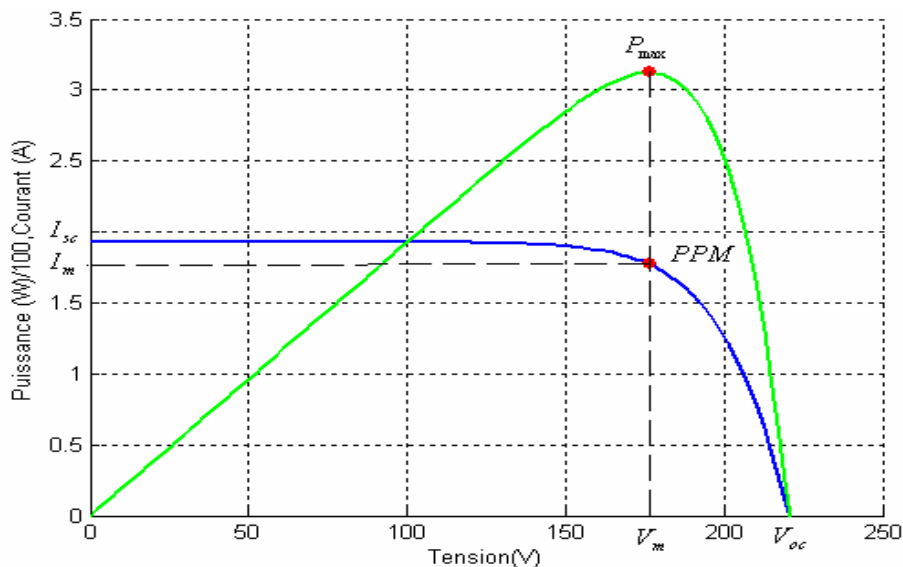
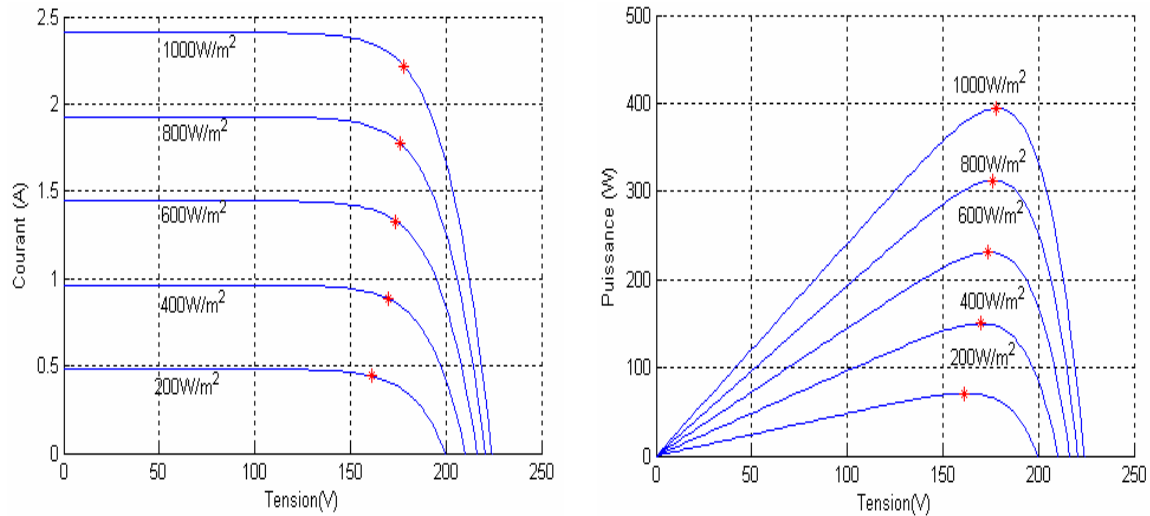


Figure (3.9) : Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur PV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs $MPPT$ sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques [41-42-43-44].

La puissance de fonctionnement du générateur PV est facilement calculée à partir du produit tension-courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des conditions climatiques (éclairement, température). Cette référence, étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Afin de surmonter ces difficultés, plusieurs méthodes sont souvent adoptées telles que les méthodes analogiques et les méthodes numériques.

Figure (3.10) : La caractéristique $I(V)$, $P(V)$ et PPM

3.6.1 Les algorithmes du point de puissance maximale

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande *MPPT*. Nous avons fait une classification des différentes *MPPT* existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement *Hill Climbing*, *Perturb & Observ (P&O)*, *l'incrément de conductance (IncCond)* et *par intelligence artificielle* (logique floue, réseaux de neurones) [45].

Le principe des commandes *MPPT* de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ces méthodes, aujourd'hui largement utilisées de par leur facilité d'implémentation, présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du *PPM* qu'elles engendrent en régime établi car la procédure de recherche du *PPM* doit être répétée périodiquement [46].

La technique de contrôle nommée *Hill Climbing* [47], consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur

statique. Mathématiquement, le *PPM* est atteint lorsque dP_{pv}/dD est forcé à zéro par la commande.

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [48]. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

La technique des réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes [49]. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système.

3.6.2 La méthode incrémentation de la conductance (IncCond)

Dans notre travail, on a choisi la méthode incrémentation de la conductance. L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [42-50].

La puissance produite par le générateur *PV* peut être exprimé par:

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv} \quad (3.14)$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension V_{pv} :

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.15)$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.16)$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.17)$$

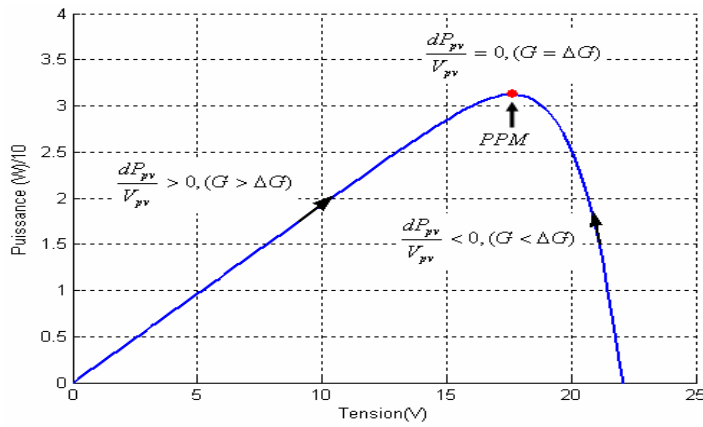


Figure (3.11) : PPM par méthode incrémentation de la conductance

Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure (3.12).

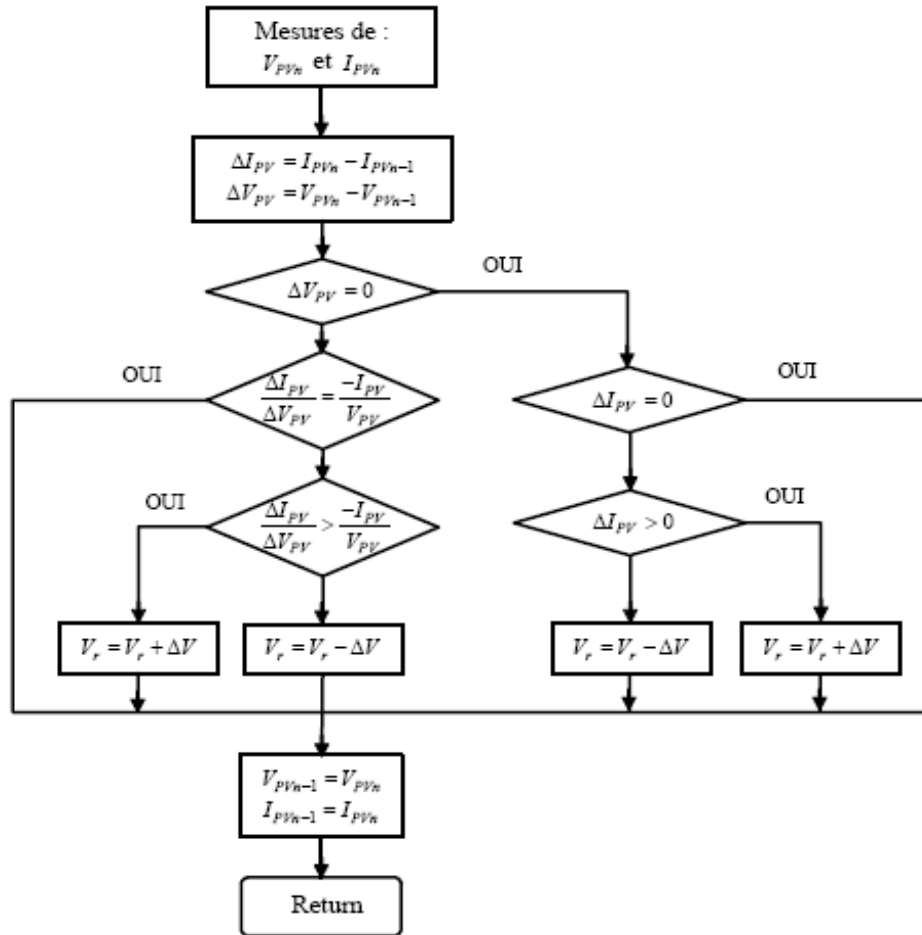


Figure (3.12) : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode (Inc-Cond)

La figure (3.11) permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du *PPM*.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le *PPM*.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du *PPM*.

3.7 Principe de la commande MPPT

La commande *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système *PV* et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur *PV* dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale [51], le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau *PV*.

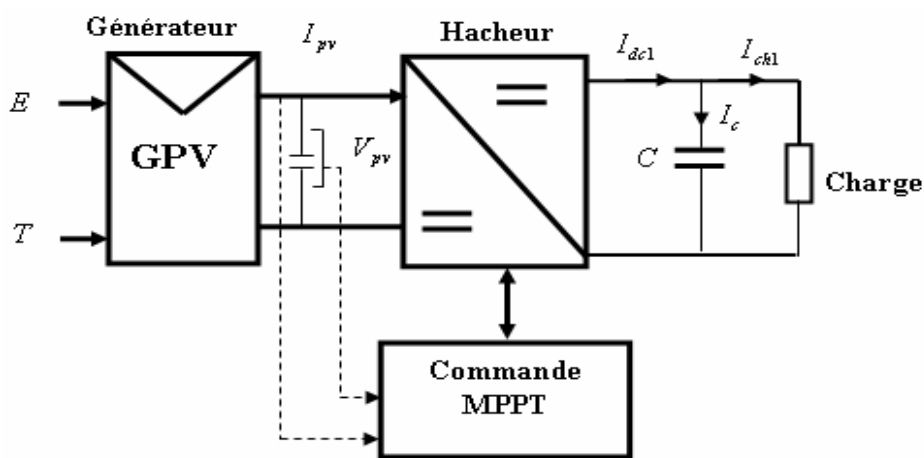


Figure (3.13) : Schéma synoptique du système *PV* par une commande *MPPT*

3.7.1 Hacheur survolteur

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré dans la figure (3.14). Il est utilisé premièrement pour adopté le niveau de tension et deuxièmement pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale.

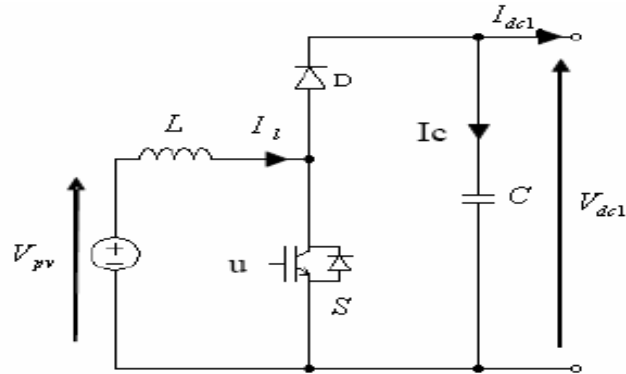


Figure (3.14) : Schéma électrique du convertisseur

3.7.2 Modélisation du hacheur survolteur

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande u . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S , que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle [52, 53,54].

- Lorsque S est fermé:

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} \quad (3.18)$$

$$0 = C \frac{dV_{dc1}}{dt} + I_{ch1} \quad (3.19)$$

- Lorsque S est ouvert:

$$V_{pv} = L \frac{di_l}{dt} + V_{dc1} \quad (3.20)$$

$$I_l = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch1} \quad (3.21)$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $u = 0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} + V_{dc1}(1-u) \quad (3.22)$$

$$(1-u)I_l = C \frac{dV_{dc1}}{dt} + I_{ch1} \quad (3.23)$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type *MATLAB SIMULINK*.

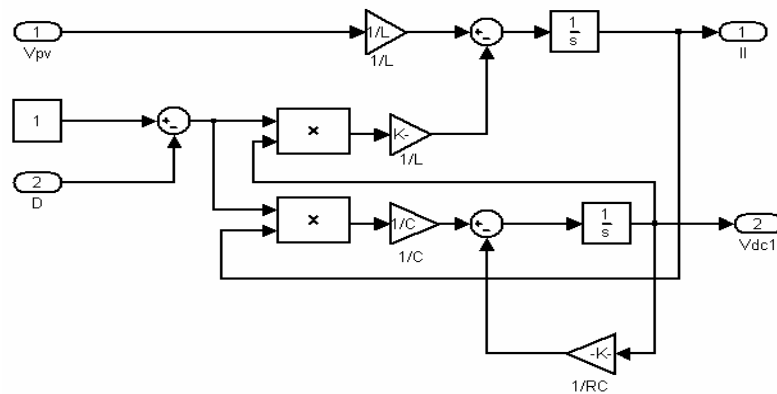


Figure (3.15) : Schéma bloc du hacheur

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'état V_{dc1} et I_l . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T_d = 1/f_d$, c'est-à-dire le rapport cyclique D ($D = T_{on}/T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes. Soit :

$$\frac{dI_l}{dt} = -(1-D)\frac{V_{dc1}}{L} + \frac{V_{pv}}{L} \quad (3.24)$$

$$\frac{dV_{dc1}}{dt} = (1-D)\frac{I_l}{C} - \frac{V_{dc1}}{RC} \quad (3.25)$$

3.7.3 Commande du hacheur survolteur

Concernant la commande du hacheur survolteur (figure 3.14), on a mis en place une commande de type cascade, une régulation du courant dans la bobine par hystérésis et une boucle de régulation de la tension V_{dc1} .

A partir de l'erreur sur la consigne de courant et après passage dans un relais pour être entre 0 et 1 et ce signal sert directement de commande pour l'interrupteur (figure 3.15).

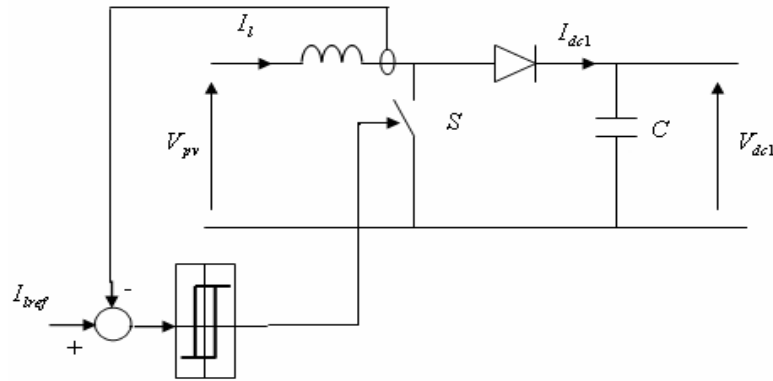


Figure (3.16) : Régulation de la tension du bus par hacheur

Quant à la boucle de tension, elle assure une tension constante en sortie du convertisseur. Dans la structure cascade, elle permet de générer la consigne de la boucle de courant. Cette boucle de tension doit être lente par rapport à la boucle de courant. Le correcteur choisi est un PI.

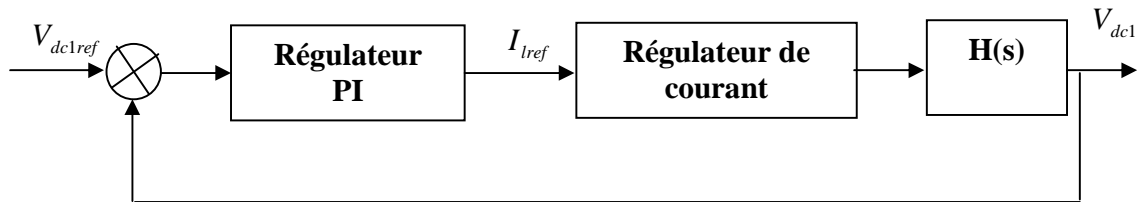


Figure (3.17) : Régulation de la tension du bus par hacheur

Le correcteur utilisé est un correcteur de type proportionnel intégral de la forme:

$$H_{PI}(s) = K_1 \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3.26)$$

On part de l'équation du système

$$(1-D)I_l = \frac{V_{pv}}{V_{dc1}} I_l = C \frac{dV_{dc1}}{dt} + \frac{V_{dc1}}{R} \quad (3.27)$$

D'où:

$$V_{pv} I_l = CV_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} + \frac{V_{dc1}^2}{R} \quad (3.28)$$

On fait le changement de variable $N = V_{dc1}^2$ et on obtient la fonction de transfert

$$\frac{N}{I_l} = \frac{V_{pv}}{Cs + \frac{1}{R}} \quad (3.29)$$

$$\text{Si } R \gg \Rightarrow \frac{N}{I_l} = \frac{2V_{pv}}{Cs} \quad (3.30)$$

$$H(s) = \frac{N}{I_l} = \frac{2V_{pv}}{Cs} \quad (3.31)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut :

$$H_{bo}(s) = K_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 s} \right) \left(\frac{2V_{pv}}{Cs} \right) \quad (3.32)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donc :

$$H_{bf}(s) = \frac{H_{bo}(s)}{1 + H_{bo}(s)}$$

$$H_{bf} = \frac{1 + T_1 s}{\frac{CT_1}{2K_1 V_{pv}} s^2 + T_1 s + 1} \quad (3.33)$$

Soit les paramètres du régulateur de tension :

$$K_1 = \frac{C \omega_{Bp}}{V_{pv}} \quad \text{et} \quad T_1 = \frac{2\xi}{\omega_{Bp}}$$

Typiquement on prend:

$$\omega_{Bp} = \frac{\omega_{dec}}{100} \quad \text{et} \quad \xi = 0.7.$$

3.7.4 Résultats de simulations

Pour tester l'efficacité de l'algorithme utilisé dans le système de conversion photovoltaïque, nous avons utilisé un profil d'éclairement représenté au dans la figure (3.18) avec la température est constante égale à 25°C. L'allure de la tension de sortie du système photovoltaïque est donnée par la figure (3.19). On peut constater que la tension son bien règles avec des perturbation de ne dépasse pas 20% lors de variation de l'éclairement.

La deuxième teste, l'éclairement constante est garder constante à une valeur moyenne de 800W/s, la température varier selon la figure (3.20) on peut constate aussi la bonne régulation de la tension avec des perturbation aussi ne dépasse pas 20% (figure (3.21)). La troisième teste, on applique les variations de l'éclairement et de la température au même temps comme représentent dans les figures (3.18), (3.20) on constate que les dépassements lors de perturbation ne dépasse pas 15%, les allures de tension et de puissance pour cette application sont données figures (3.22) et (3.23). Pour ces perturbations (les trois cas) en distingue que le temps de réponse ne dépasse pas 0.05s

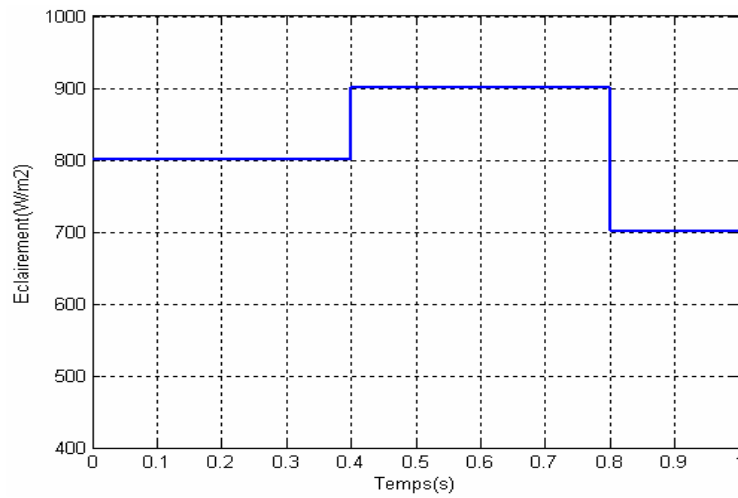
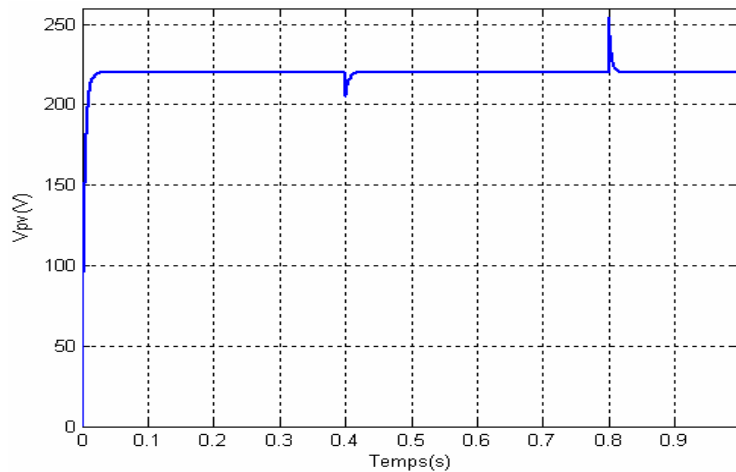


Figure (3.18) : Eclairement en fonction du temps

Figure (3.19) : Tension V_{dc1} en fonction du temps

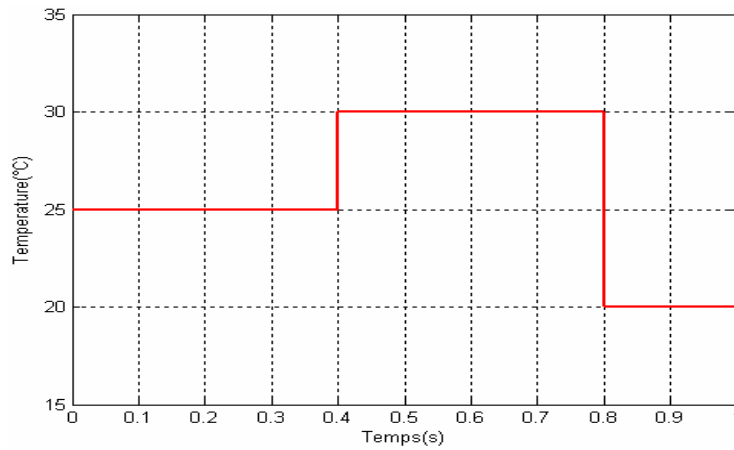


Figure (3.20) : La température en fonction du temps

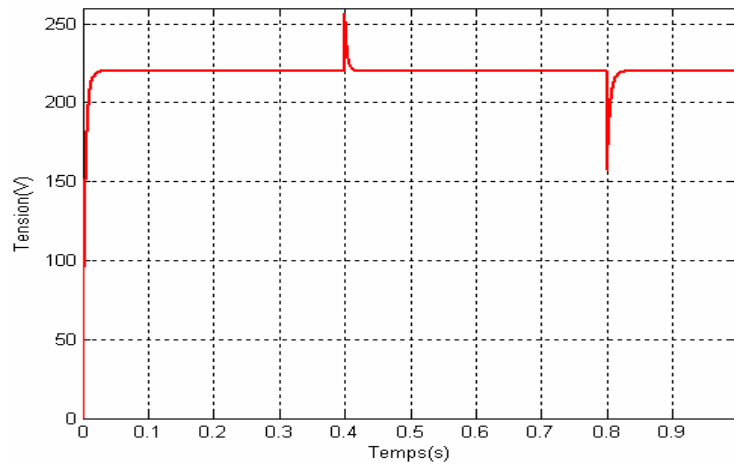


Figure (3.21) : Tension V_{dc1} en fonction du temps

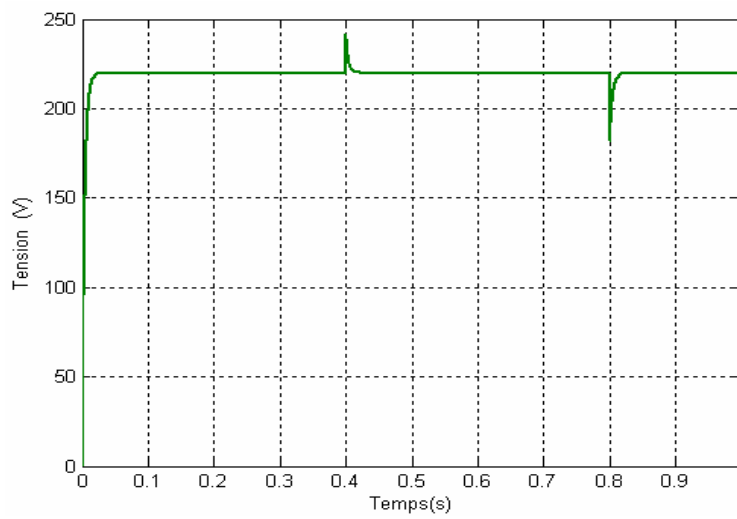


Figure (3.22) : Tension V_{dc1} en fonction du temps

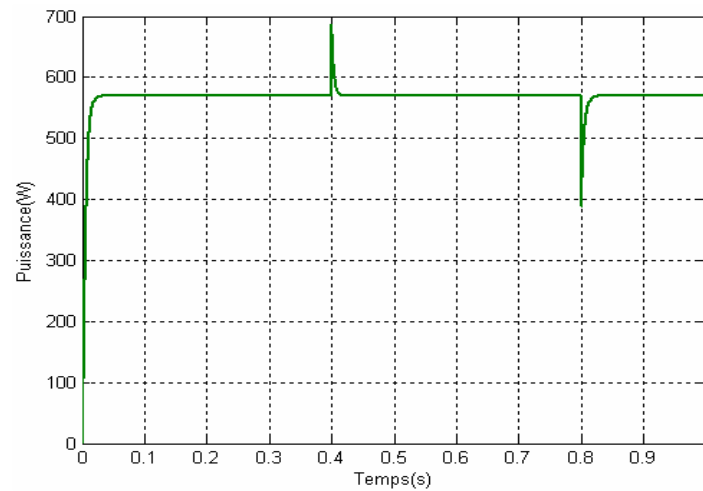


Figure (3.23) : La puissance en fonction du temps

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale des différentes parties du système de conversion photovoltaïque. Dans un premier temps, nous avons commencé l'étude par détailler les caractéristiques d'un *GPV* ; ensuite, une présentation du modèle des éléments constituant la chaîne photovoltaïque avec les implications sur le rendement d'une installation *PV* de la caractéristique non linéaire de ce générateur sont fournis. Nous avons également montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le *GPV* par le biais d'un étage d'adaptation avec fonction de recherche du point de puissance maximale *MPPT*.

Chapitre - 4 :

Modélisation et commande du système de conversion éolienne

4.1 Introduction

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Le schéma bloc de l'éolienne étudiée dans ce travail est présenté dans la figure (4.1).

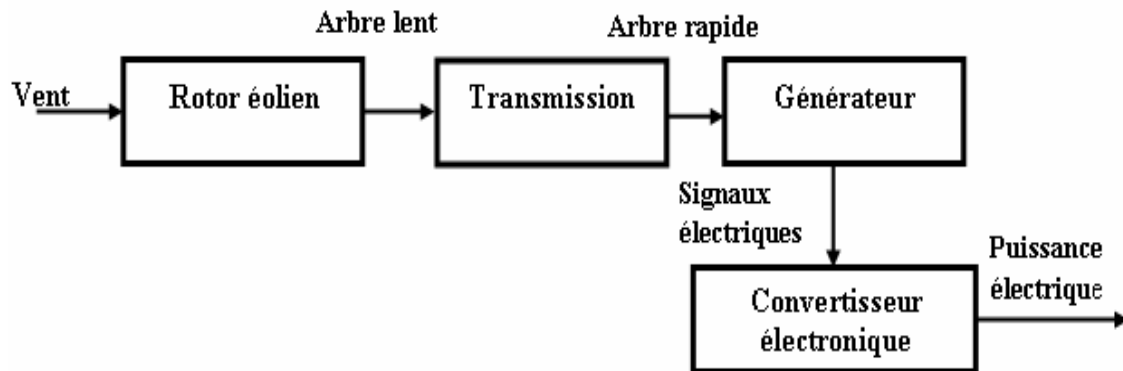


Figure (4.1) : Structure du système de conversion éolien

4.2 Modélisation du générateur éolien

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents à travers un multiplicateur et raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, est représenté sur la figure (4.2). La modélisation et la commande de ces différents organes seront développées par suite.

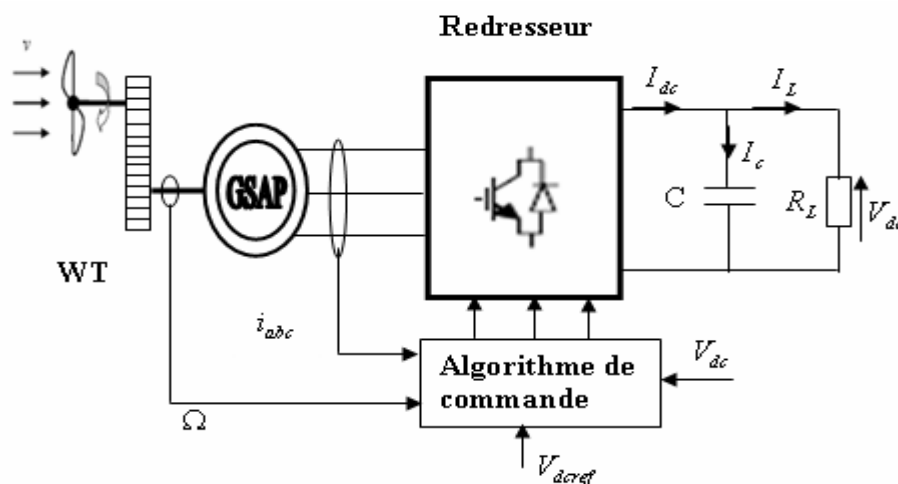


Figure (4.2) : Structure du générateur éolien étudié

4.2.1 Modèle du vent

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande. Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a déjà fait l'objet de nombreux travaux [56,57] et par conséquent, elle ne sera pas détaillée dans ce travail. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V_v = f(t) \quad (4.1)$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V_v = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t) \quad (4.2)$$

4.2.2 Modèle de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [57] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (4.3)$$

Avec:

ρ : est la masse volumique de l'air ($kg \cdot m^{-3}$).

V_v : est la vitesse du vent (m/s).

S : est la surface traversée par le vent ; sa surface utile est donnée par l'expression (4.4) selon la figure (4.3) :

$$S = 2R.H \quad (4.4)$$

Avec : R représentant le rayon de la voilure (m) et H sa hauteur (m).

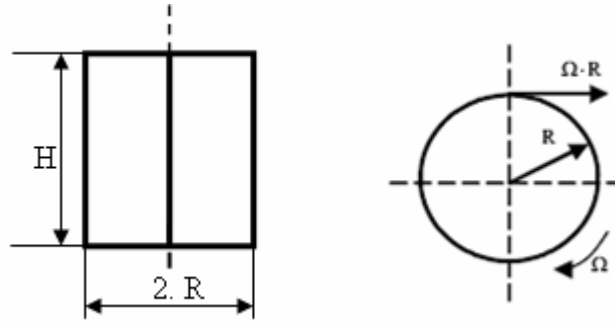


Figure (4.3) : Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité [58-59]. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est fournie par la limite de Betz :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_v = 0.59.P_v \quad (4.5)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2.P_{\max}}{\rho.S.V_v^3} = 0.59 \quad (4.6)$$

Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par :

$$C_p = \frac{2.P_{eol}}{\rho.S.V_v^3} \quad (4.7)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite (spécifique) λ qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent est donnée par :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V_v} \quad (4.8)$$

Avec: Ω la vitesse de rotation des pales (rad/s).

Selon la caractéristique propre de la voilure $C_p(\lambda)$ de l'équation (4.7) la puissance éolienne est calculée ainsi :

$$P_{eol} = \frac{1}{2}.C_p(\lambda).\rho.S.V_v^3 \quad (4.9)$$

L'équation analytique de C_p en fonction de λ résultant de l'interpolation, est donnée

$$\text{par : } C_p(\lambda) = -0,2121.\lambda^3 + 0,0856.\lambda^2 + 0,2539.\lambda \quad (4.10)$$

La figure (4.4) présente le tracé de la caractéristique. Il apparaît un maximum pour une vitesse réduite de 0.78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut essayer de conserver cette vitesse réduite, soit modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

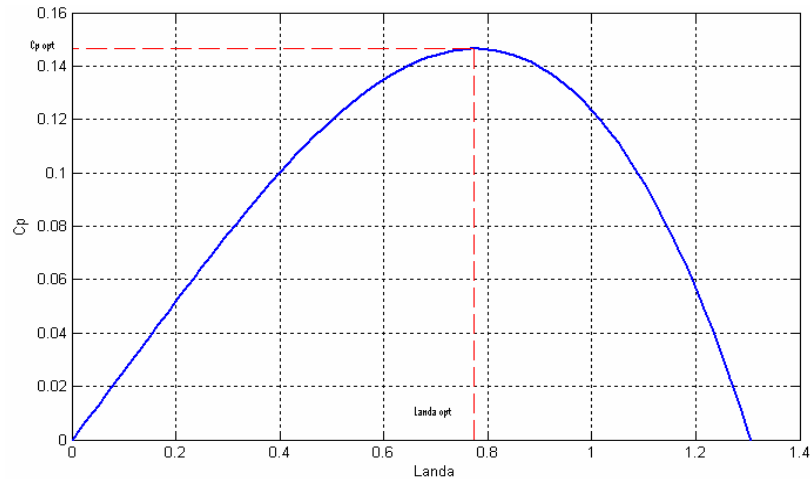


Figure (4.4) : Courbe $C_p(\lambda)$ de la voile étudiée de type Savonius

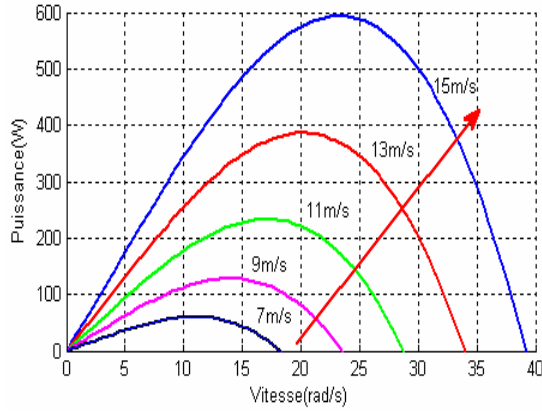
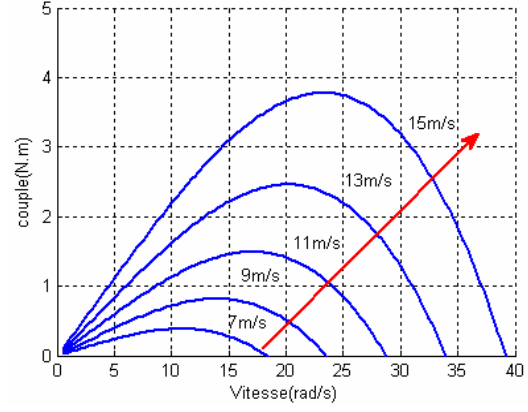
A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} \quad (4.11)$$

Si, en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant l'expression (4.8) de la vitesse réduite, on obtient :

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V_v^2}{\lambda} \quad (4.12)$$

Les figures (4.5 et 4.6) présentent un réseau de caractéristiques respectivement de puissance et couple éolienne en fonction de la vitesse de rotation, le paramètre étant la vitesse du vent.

Figure (4.5) : Caractéristiques $P_{eol}(\Omega)$ Figure (4.6) : Caractéristiques $C_{eol}(\Omega)$

4.2.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [58].

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{génératrice}}{G} \quad (4.13)$$

Avec: G gain de multiplicateur.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur

$$C_{générateur} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (4.14)$$

4.2.4 Modélisation de l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble [59].

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m - f_t) \Omega \quad (4.15)$$

Avec :

$$J = J_t + G^2 J_m \quad (4.16)$$

$$f = f_t + G^2 f_m \quad (4.17)$$

J_t, J_m : Inerties de la turbine et de la machine, resp.

f_m : Coefficient de frottement de la machine

f_t : Coef. de frottement des pâles

C_{eol} : Le couple statique fournie par l'éolienne

4. 2.5 Modèle de la machine synchrone

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [61]:

- . L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- . La distribution sinusoïdale de le *FMM* créée par les enroulements du stator.
- . L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- . L'effet d'encoche est négligeable.
- . La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Avec:

R_s : La résistance des phases statoriques.

$[V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^T$: Les tensions des phases statoriques.

$[i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T$: Les courants des phases statoriques.

$[\phi_{sa} \phi_{sb} \phi_{sc}]^T$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé (figure (4.7)), la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine

est donc représenté par deux variables indépendantes.

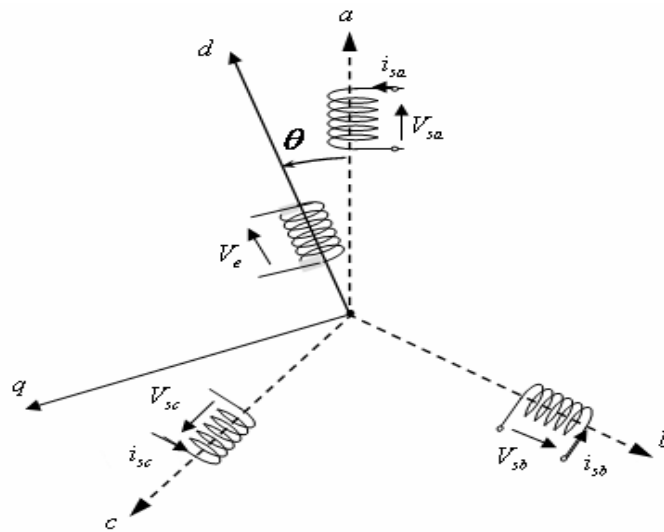


Figure (4.7) : Structure de la génératrice synchrone

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine (figure (4.8)) sera utilisé V_{sd}, V_{sq} et I_{sd}, I_{sq} . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage.

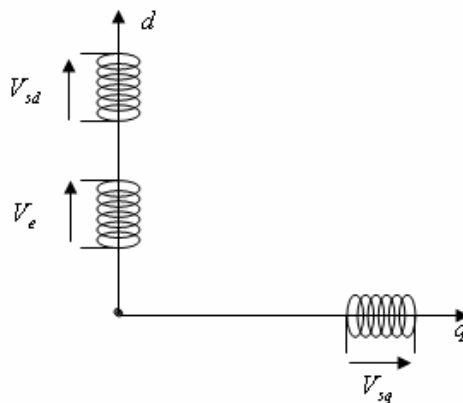


Figure (4.8) : Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq)

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][V_{sabc}]. \tag{4.19}$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)][i_{sabc}]. \tag{4.20}$$

Avec:

$P(\theta)$ Matrice de **PARK** est donnée par:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - p\Omega \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + p\Omega \phi_{sd} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoidale des conducteurs, ϕ_{sd} et ϕ_{sq} sont fonctions linéaires des courants I_{sd} et I_{sq} :

$$\phi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \phi_e \quad (4.23)$$

$$\phi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \quad (4.24)$$

Où: ϕ_e représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - L_s \cdot p\Omega i_{sq} \quad (4.25)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + L_s \cdot p\Omega i_{sd} + \phi_e p\Omega \quad (4.26)$$

$$\omega = p\Omega \quad (4.27)$$

Avec :

i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

R_s : Résistance statoriques [Ω]

L_s : Inductance cyclique statorique [H]

p : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

ω : Pulsation des tensions [rad/s]

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sd} - R_s i_{ds} + L_s \cdot p \cdot \Omega \cdot i_{sq}) \quad (4.28)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s i_{qs} - L_s \cdot p \cdot \Omega \cdot i_{sd} - \phi_e \cdot p \cdot \Omega) \quad (4.29)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \frac{1}{L_s} \left[\begin{pmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & -L_s p \Omega \\ L_s p \Omega & R_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_e \cdot p \cdot \Omega \end{pmatrix} \right] \quad (4.30)$$

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.e.m. sinusoïdale peut être donné par la relation suivante:

$$C_e = \frac{3}{2} p [\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}] \quad (4.31)$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire :

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} + I_{sq} \phi_e] \quad (4.32)$$

Avec $L_{sd} = L_{sq} = L_s$

Le couple électromagnétique sera :

$$C_e = \frac{3}{2} P \phi_e I_{sq} \quad (4.33)$$

4. 2.6 Modélisation de l'association MSAP – Redresseur commandé

4. 2.6.1 Introduction

Après avoir présenté le modèle de la machine, nous exposerons le système d'entraînement complet où la machine synchrone est associée au redresseur commandé. La figure (4.9) illustre le schéma de principe de cette association.

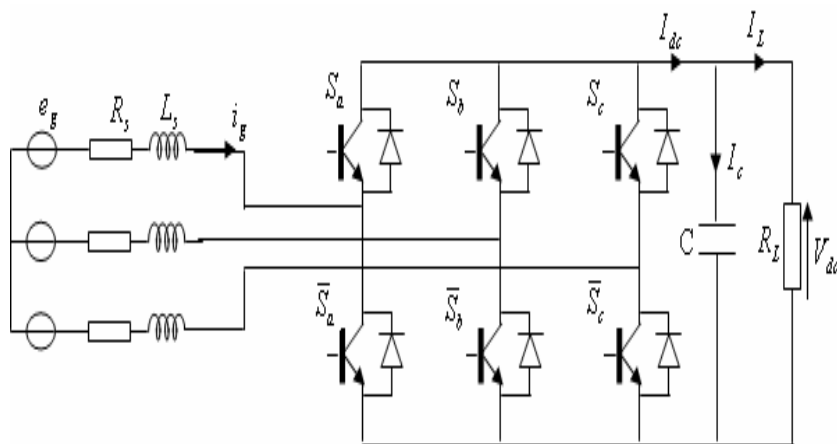


Figure (4.9) : Schéma de l'association MSAP – redresseur commandé

4.2.6.2 Modèle mathématique du redresseur commandé

Dans l'étude de l'ensemble commande – machine – redresseur - charge, nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance Infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le coté alternatif et le cote continu. Ensuite la liaison entre le coté alternatif et le coté continu au travers des interrupteurs ; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [62-63]:

$$S_j = \begin{cases} +1, \bar{S}_j = -1 \\ -1, \bar{S}_j = +1 \end{cases} \quad \text{Pour } j = a, b, c$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j , V_{dc} et les courant d'entrée i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0. \quad (4.34)$$

Les tensions d'entrée entres phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{aligned} u_{Sab} &= (S_a - S_b)V_{dc} \\ u_{Sbc} &= (S_b - S_c)V_{dc} \\ u_{Sca} &= (S_c - S_a)V_{dc} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Avec:

$$\begin{aligned} u_{Sa} &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{Sb} &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} V_{dc} \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$u_{Sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} V_{dc}$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage des cotés alternatif et continu:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) - I_L \quad (4.38)$$

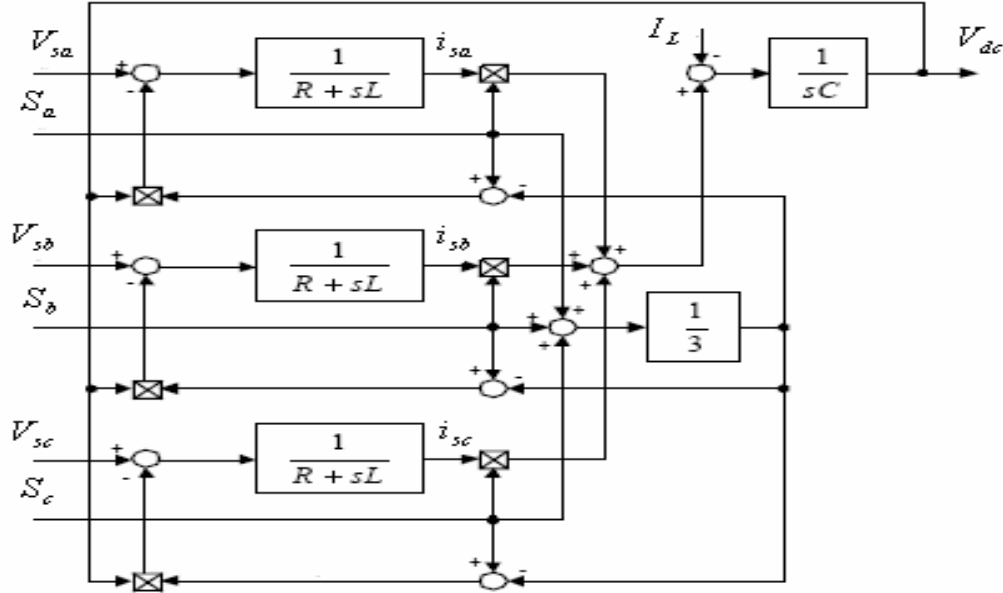


Figure (4.10) : Modélisation du redresseur dans un repère fixe lié aux axes abc [64]

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones dq sont:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_s i_{sq} + u_{sd} \quad (4.39)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_s i_{sd} + u_{sq} \quad (4.40)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_d i_{sd} + S_q i_{sq}) - I_L \quad (4.41)$$

Avec:

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \sin(\omega t)$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \sin(\omega t).$$

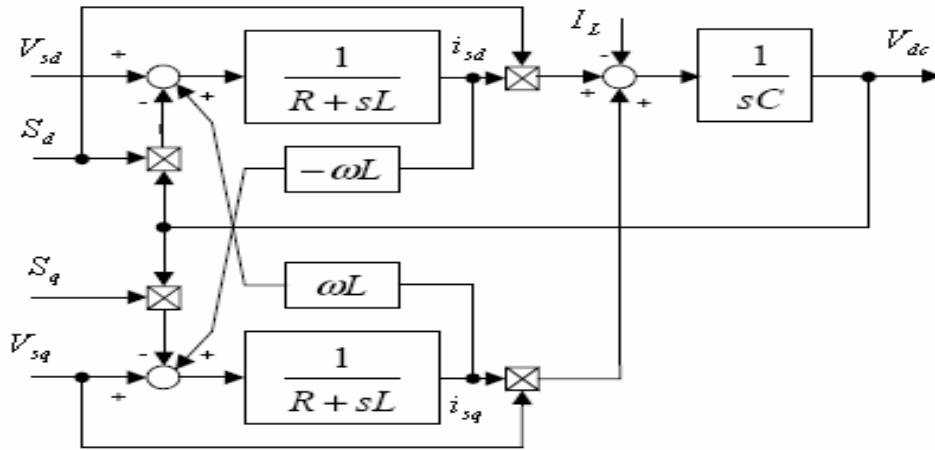


Figure (4.11) : Modélisation du redresseur dans un repère lié aux axes dq [64]

4.3 Commande du générateur éolien

Le schéma bloc de la commande du générateur éolien est représenté à la figure (4.12). La commande de ce système basée sur deux fonctions, l'algorithmique d'extraction du maximum de puissance (*MPPT*) et le contrôle du bus continue à la sortie de redresseur. Le principe de contrôle des courants par hystérésis est celui qui est utilisé dans le présent projet. Ce type de commande est robuste et facile à mettre en oeuvre. Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité et une bonne précision. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis.

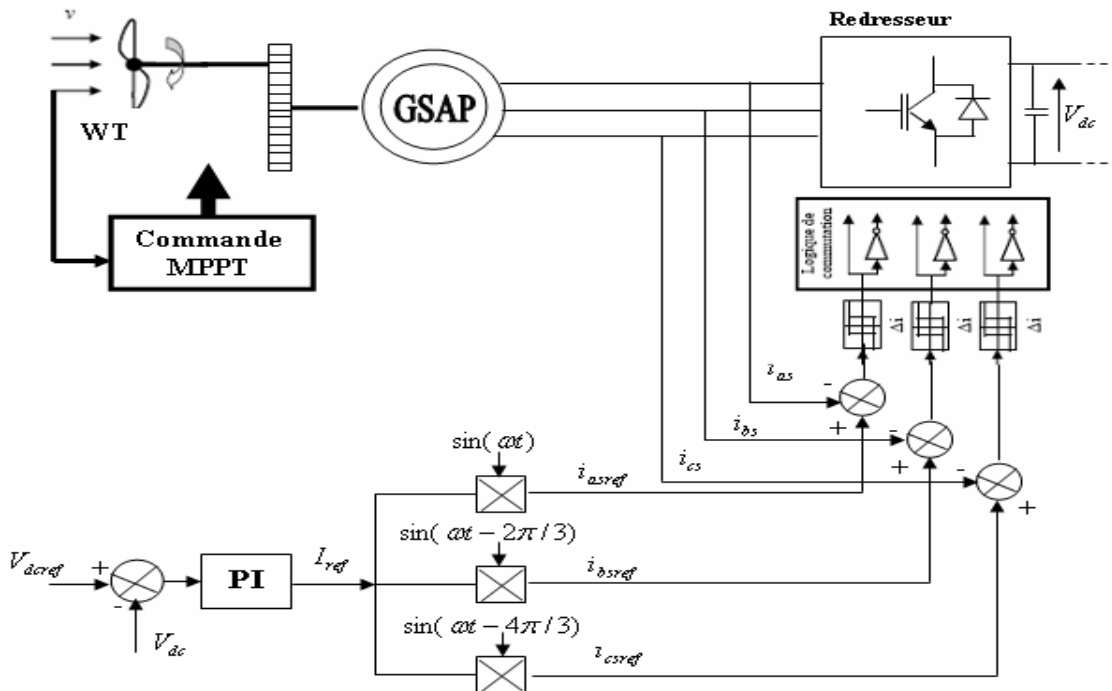


Figure (4.12) : Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone

4.3.1 Stratégie de maximisation de la puissance

Les équations de la puissance électrique et mécanique du système en régime permanent permettent à nouveau la formulation du nouvel objectif principal. Cependant, pour la fonction de la puissance mécanique, une forme plus simple est utilisée. Pour réduire les degrés de liberté du système, la vitesse du vent, seule variable non contrôlable du système, est sortie de la formulation mathématique par l'utilisation d'une forme optimale [65-66].

L'équation (4.9) donne la puissance correspondant à une vitesse de vent V_v :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (4.42)$$

Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale λ^{opt} , le coefficient de puissance est toujours à sa valeur maximale $C_{pM} = C_p(\lambda^{opt})$. Donc, la puissance de l'éolienne est aussi à sa valeur maximale :

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (4.43)$$

D'autre part, si de l'équation du rapport de vitesses supposé maintenu à la valeur optimale on isole la vitesse de vent (4.44) pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale (4.43), on obtient l'équation (4.45).

$$\lambda^{opt} = \frac{\Omega \cdot R}{V_v} \Rightarrow V_v = \frac{R}{\lambda^{opt}} \cdot \Omega \quad (4.44)$$

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \cdot \Omega^3 \quad (4.45)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω uniquement.

En considérant que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (4.45) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \cdot \Omega^2 \quad (4.46)$$

La figure (4.13) présente un réseau de caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation où la courbe noire représente les lieux de la puissance optimale, ce qui correspond à l'équation (4.45).

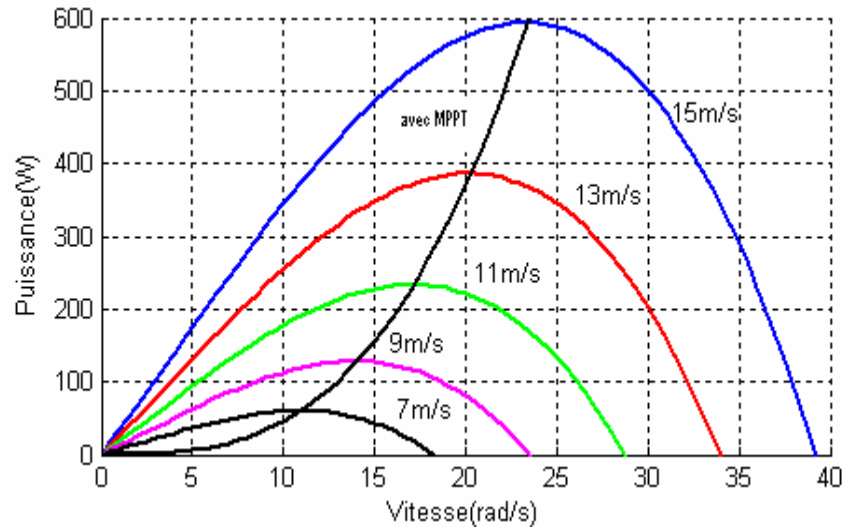


Figure (4.13) : Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation

4. 3.1.1 Résultats de simulation

En utilisant les paramètres électriques et géométriques de la machine dimensionnée (voir chapitre-2), nous avons simulé le modèle de profil de vent considéré comme représenté dans la référence [65]. La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V_v(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047.t) + 2\sin(0.2665.t) + \sin(1.2930.t) + 0.2\sin(3.6645.t). \quad (4.47)$$

Les résultats de simulation des figures (4.14-16) représentant respectivement la vitesse du vent simulée par l'équation (4.47), la vitesse de rotation de l'éolienne optimisée par le dispositif MPPT, la puissance optimale correspond à la vitesse optimale.

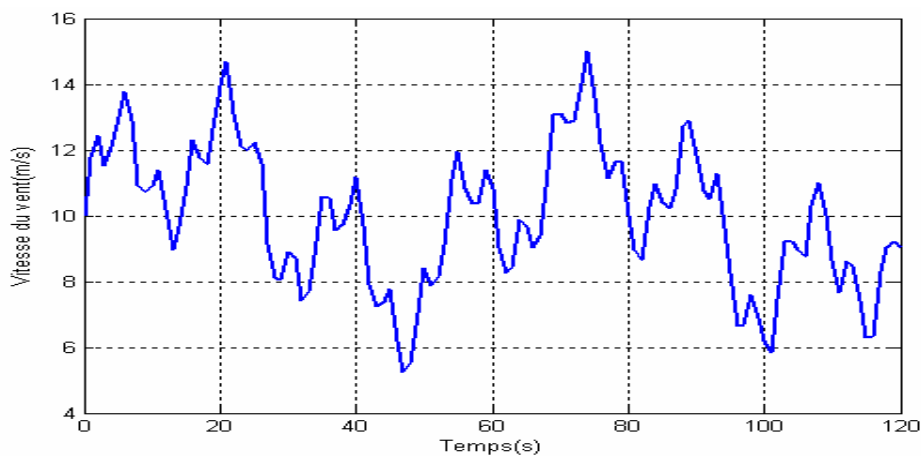


Figure (4.14) : Vitesse du vent en fonction du temps

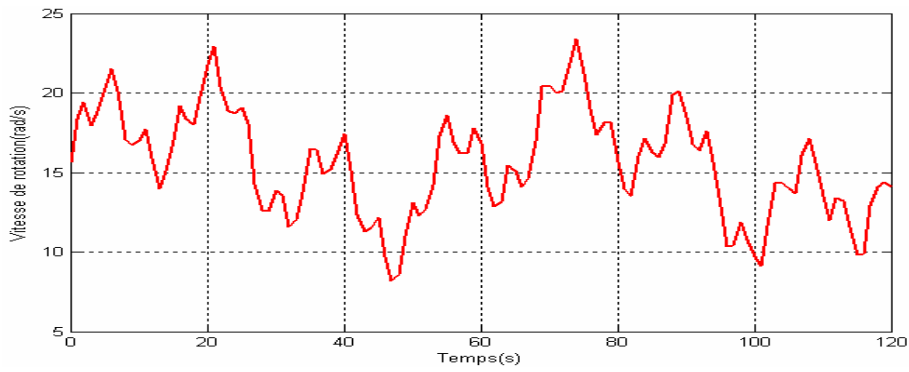


Figure (4.15) : Vitesse de rotation optimisée en fonction du temps

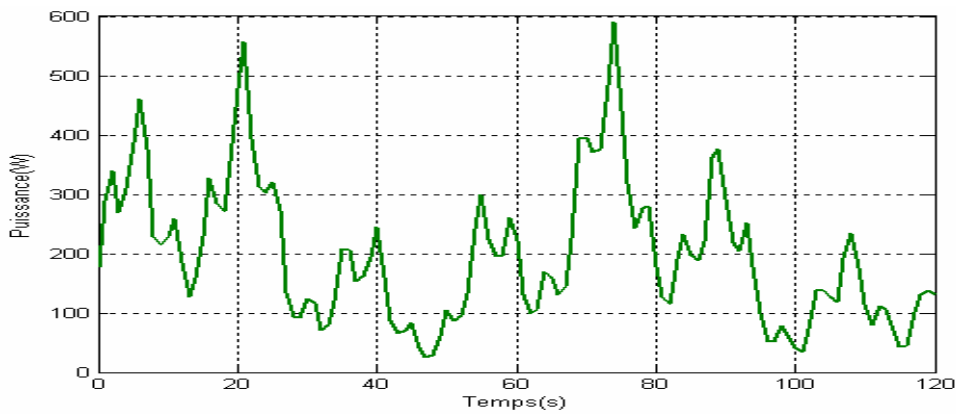


Figure (4.16) : Puissance optimale en fonction du temps

Les figures (4.17, 18) présentent une simulation du modèle de la générateur pour une vitesse moyenne du vent 15m/s. La figure (4.17) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la machine qui est de 24.2 rad/s. La figure (4.18) présente l'évolution de la puissance qui atteint alors sa puissance nominale qui correspond à 600W avec les valeurs de base considérées.

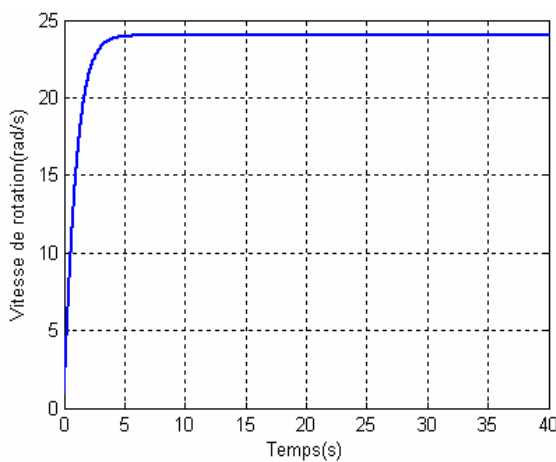


Figure (4.17) : Vitesse de rotation

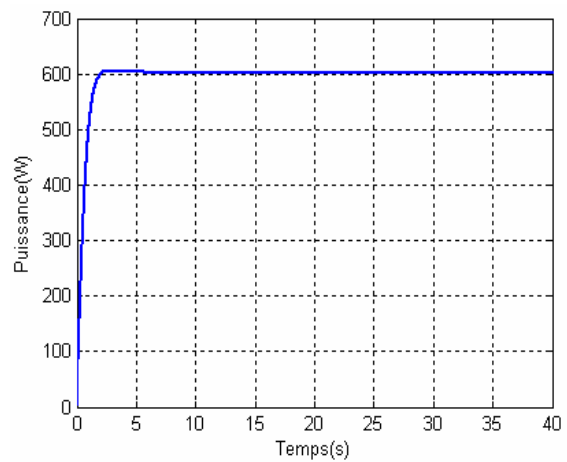


Figure (4.18) : Puissance éolienne

4.3.2 Commande de la l'association GSAP – redresseur

La figure (4.12) présente le schéma de principe de la stratégie de contrôle par hystérésis à régulateurs indépendants pour le contrôle du courant d'une machine synchrone à aimants permanents. Quand le courant instantané d'une phase s'écarte de sa valeur de référence d'une valeur $\Delta h/2$, fixée par la bande du correcteur à hystérésis, une commutation est imposée aux interrupteurs du bras du redresseur correspond, de façon à maintenir le courant réel à l'intérieur d'une bande $\mp \Delta h/2$ entourant le courant de référence comme le montre la figure (4.19). Cette stratégie utilise trois correcteurs à hystérésis indépendants, un par phase [67]. Les correcteurs à hystérésis utilisés sont des correcteurs à deux niveaux. Le correcteur de chaque phase ($g = a, b, c$) agit selon la différence entre le courant de référence i_{sgref} et le courant réel i_{sg} circulant dans une phase de la machine ($g = a, b, c$). Chaque correcteur génère un signal de commande C_g est donné par la relation suivante:

$$\begin{cases} C_g = 1 \\ C_g = 0 \end{cases} \text{ si } \begin{cases} \Delta i_{sg} = (i_{sgref} - i_{sg}) \geq \Delta h/2 \\ \Delta i_{sg} = (i_{sgref} - i_{sg}) \leq -\Delta h/2 \end{cases} \quad (g = a, b, c)$$

A l'intérieur de la zone d'hystérésis, le signal logique C_g est soit égal à 1, soit égal à 0, selon le basculement précédent.

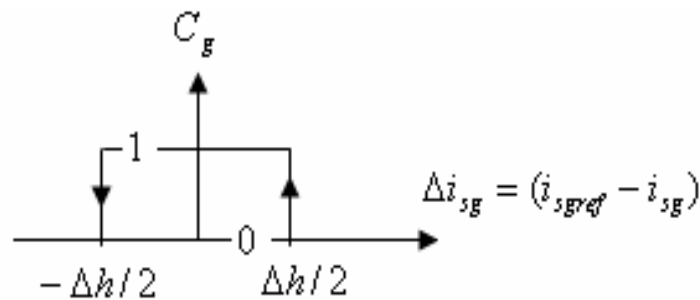


Figure (4.19) : Principe d'une commande par hystérésis

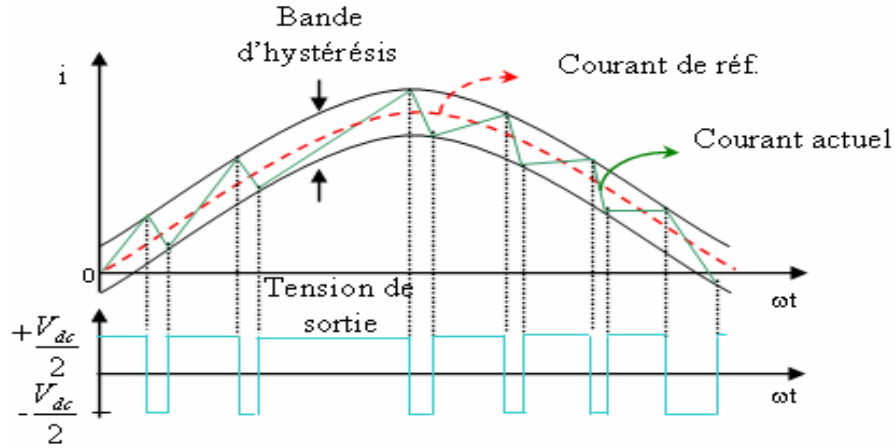


Figure (4.20) : Principe de fonctionnement d'un correcteur à hystérésis

4.3.2.1 Régulation de courant

Afin de dimensionner les régulateurs de courant, considérons le schéma de la figure (4.21) qui représente un bras du redresseur et sa commande en courant. La stratégie de contrôle consiste à introduire l'erreur de courant de phase dans un régulateur à hystérésis, les interrupteurs S_a et \bar{S}_a sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur.

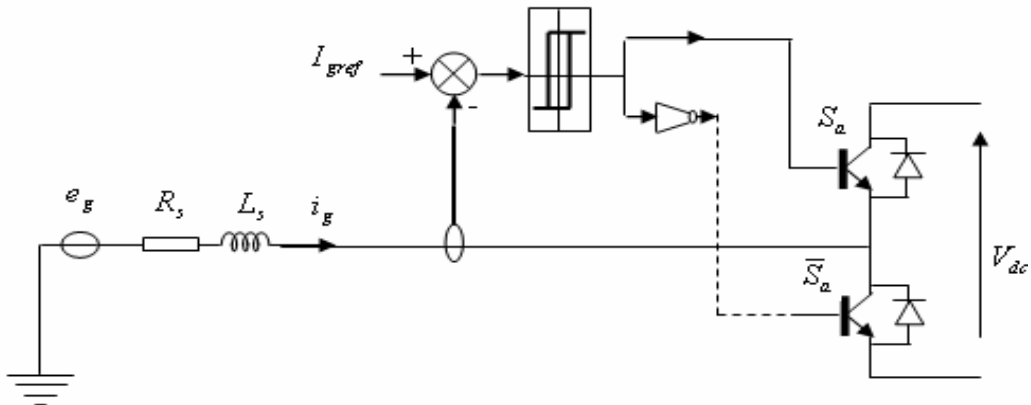


Figure (4.21) : Modèle de la régulation de courant

4.3.2.2 Régulation de la tension V_{dc}

Pour dimensionner le régulateur de tension, considérons le schéma suivant qui met en oeuvre les boucles de tension et courant en cascade.

En considérant le rendement du redresseur est unitaire, il vient :

$$P_{dc} = P_g \Rightarrow V_{dc} I_{dc} = 3e_g i_g = 3e_g \frac{\hat{I}_g}{\sqrt{2}} \tag{4.48}$$

La figure (4.9), nous permet d'écrire alors :

$$I_{dc} = I_c + I_L \tag{4.49}$$

Avec:
$$\begin{cases} I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \\ I_L = \frac{V_{dc}}{R_L} \end{cases}$$

La puissance du bus continu peut se déterminer comme suit :

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \tag{4.50}$$

Les équations (4.48) et (4.49) permettent d'établir le modèle suivant:

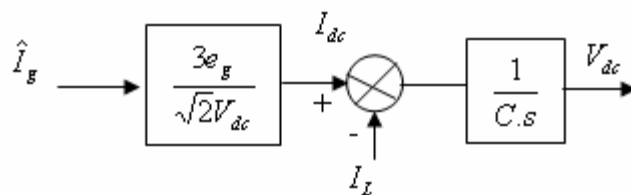


Figure (4.22) : Modèle pour la boucle de tension

Ainsi, la structure du système en boucle fermée est représentée (Figure (4.23)) :

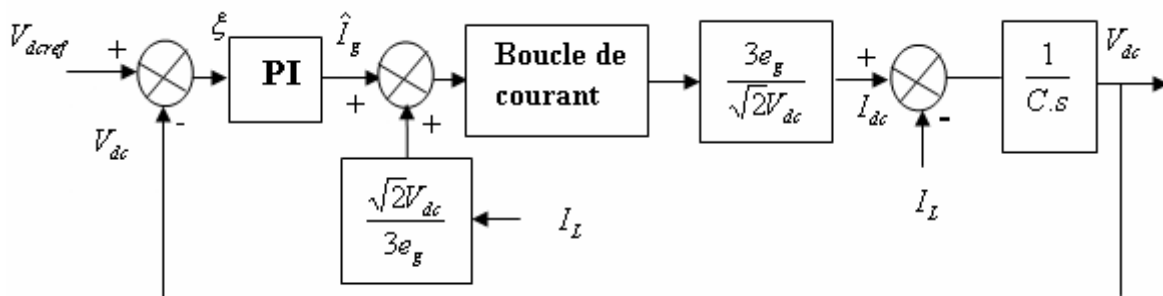


Figure (4.23) : Modèle complet en boucle fermée pour la régulation de tension

Le régulateur PI est défini par sa fonction de transfert

$$H_{PI}(s) = K_2 \left(\frac{1 + T_2 s}{T_2 s} \right) \tag{4.51}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut :

$$H_{bo}(s) = K_2 \left(\frac{1 + T_2 s}{T_2 s} \right) \left(\frac{G}{Cs} \right) \tag{4.52}$$

Avec:
$$G = \frac{3e_g}{\sqrt{2}V_{dc}}$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donc :

$$H_{bf}(s) = \frac{H_{bo}(s)}{1 + H_{bo}(s)} \quad (4.53)$$

$$H_{bf}(s) = \frac{1 + T_2 s}{\frac{CT_2}{GK_2} s^2 + T_2 s + 1} \quad (4.54)$$

L'équation obtenu (4.54) comparer avec la fonction caractéristique pour obtenir K_2 et T_2 :

$$H_{bf}(s) = \frac{1 + T_2 s}{\frac{CT_2}{GK_2} s^2 + T_2 s + 1} = \frac{1 + T_n s}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}$$

Donc:

$$K_2 = \frac{2CV_{dc}\omega_n}{3e_g} \quad (4.55)$$

$$T_2 = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (4.56)$$

La bande passante du régulateur de tension est fixée par rapport à la fréquence de la force électromotrice de la machine donc elle dépend directement de la vitesse de l'alternateur.

Typiquement on prend $\omega_n = \frac{\omega_{mes}}{10}$ et $\xi = 0.7$.

4. 3.2.3 Résultats de simulations

Dans cette partie, le fonctionnement du dispositif complet a été simulé sous l'environnement *MATLAB*[®]-*SIMULINK*[®] En utilisant les paramètres électriques de la machine (voir annexe), la référence de la tension à la sortie du redresseur est prise égale à 220V, nous avons simulé le modèle de profil de vent en deux formes:

- La vitesse du vent moyenne égale à 15m/s, les figures (4.24 et 4.25) montrent respectivement la tension et la puissance continue à la sortie du redresseur on observe que la tension du bus continu reste en moyenne égale à 220V. La figure (4.26) montre qu'en maintenant le courant de la machine synchrone à aimants permanents en phase avec sa force électromotrice.

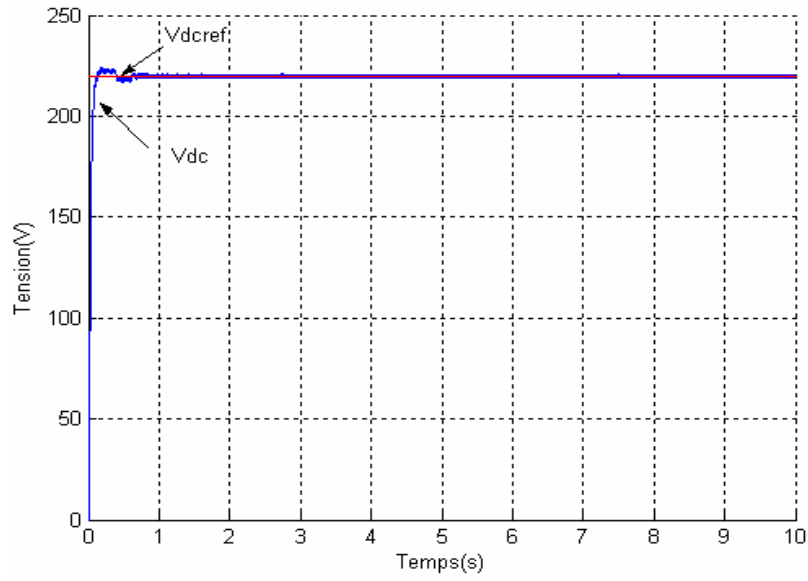


Figure (4.24) : Tension du bus continu

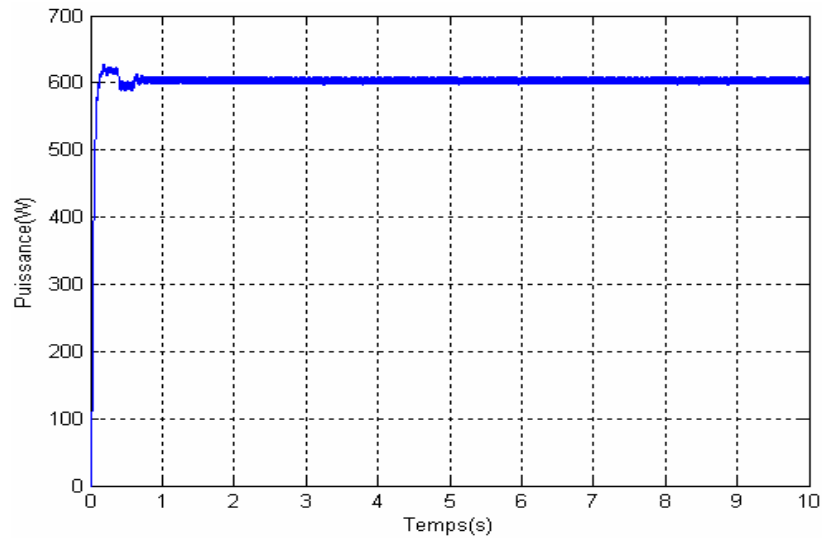


Figure (4.25) : Puissance du bus continu

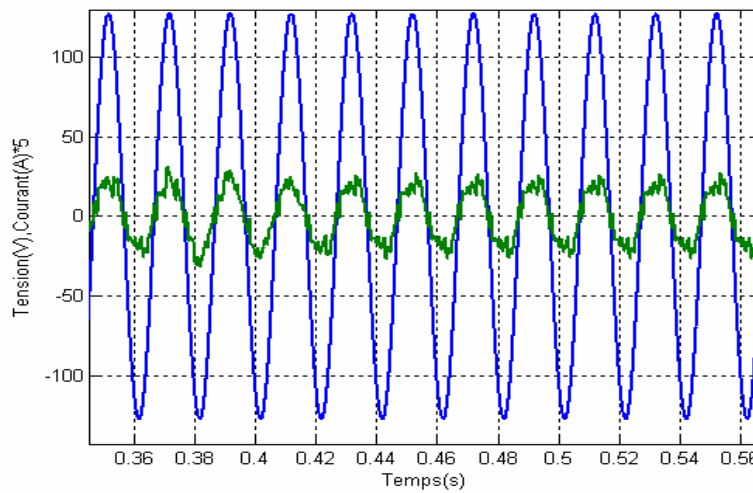


Figure (4.26) : Stratégie de commande d'une GSAP associée à un redresseur

- La variation de vitesse de vent donné à la figure (4.27), on observe que la tension du bus continu (figure (4.28)) reste en moyenne égale à 220V et respecte le cahier des charges : les surtensions ne dépassent pas 250V et les chutes de tension restent toujours supérieures à 205V. Le profil de vitesse du vent est à l'origine des fluctuations de la tension du bus. En effet, lorsque la vitesse du vent varie la commande du redresseur doit suivre le changement du point de fonctionnement afin de stabiliser la tension du bus.

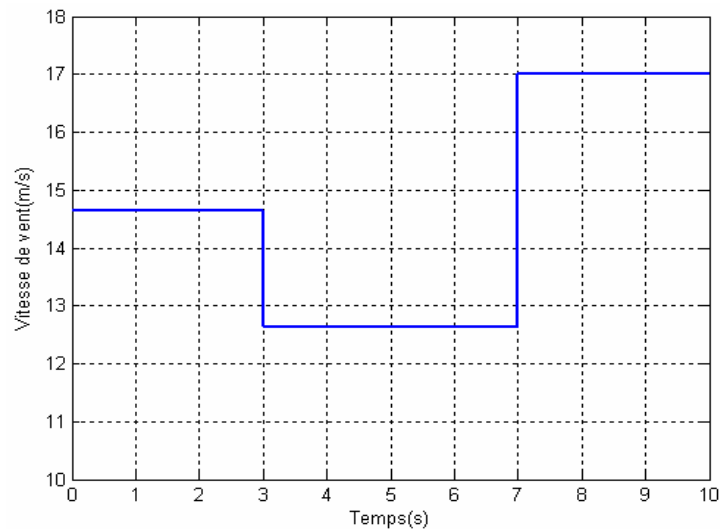


Figure (4.27) : Vitesse du vent

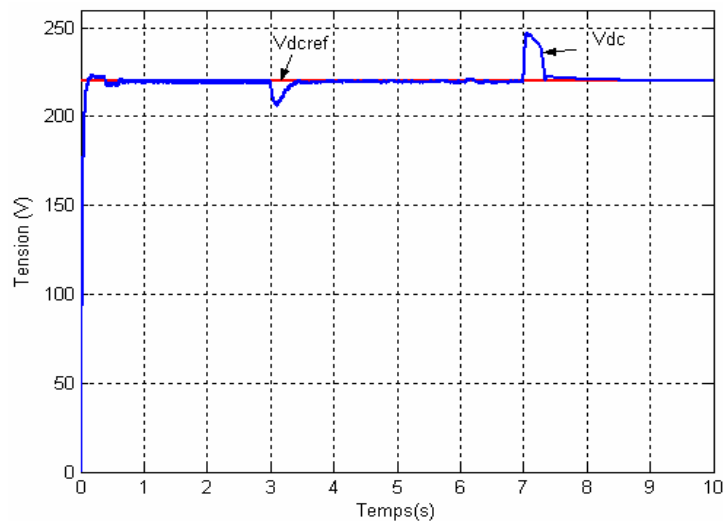


Figure (4.28) : Tension redressée

Ainsi l'allure de la tension du bus donne deux indices sur le fonctionnement de l'association entre une GSAP, un redresseur commandé :

Une augmentation de la vitesse du vent est suivie d'une surtension (Figure (4.29)) alors qu'une diminution de la vitesse du vent est accompagnée d'une chute de tension. La tension du bus est établie à 220V avec un temps de réponse qui dépend de la commande

du redresseur, de l'ordre de 0.05s dans l'exemple traité.

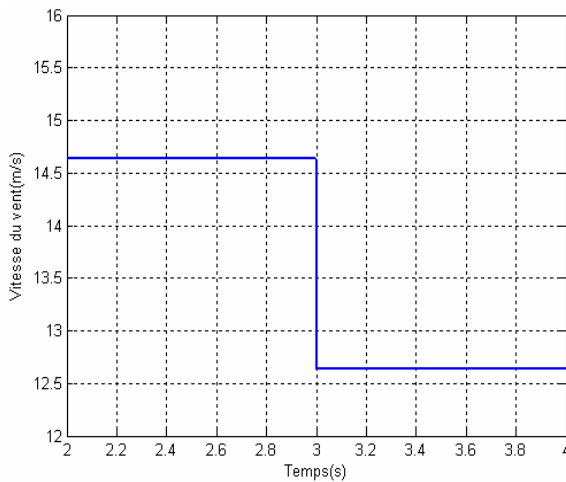
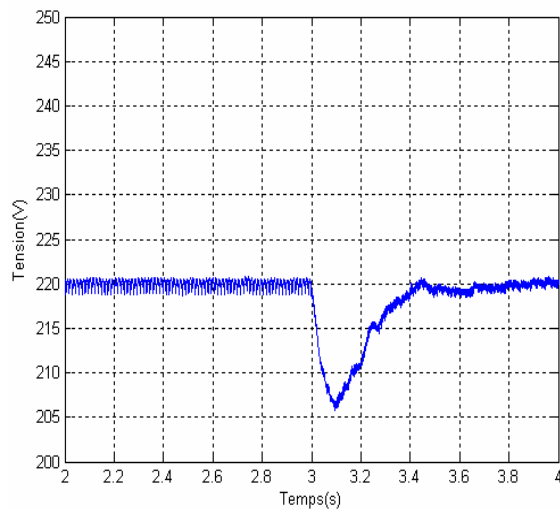


Figure (4.29) : Tension du bus pour une augmentation de la vitesse du vent

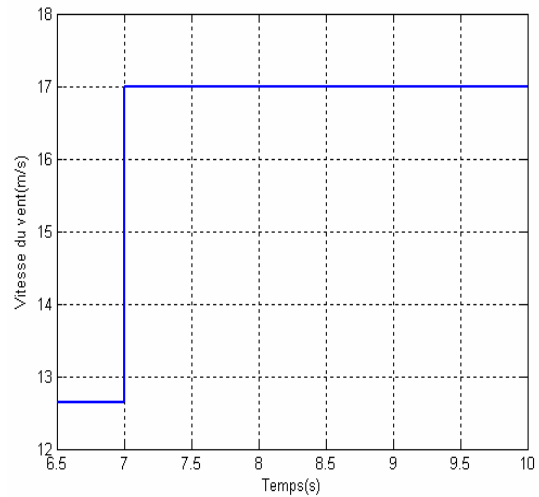
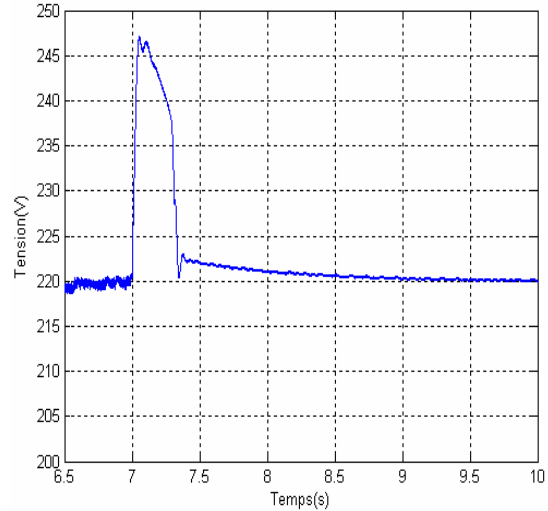


Figure (4.30) : Tension du bus pour une diminution de la vitesse du vent

- La figure (4.31) montre qu'en maintenant le courant de la génératrice synchrone à aimant permanent en phase avec sa force électromotrice on arrive à commander l'alternateur et atteindre les 220V au niveau du bus continu à vitesse du vent 15m/s. Les courants machine sont sinusoïdaux. Le phénomène d'empiètement n'existe pas avec le redresseur commandé. L'amplitude ainsi que la fréquence s'adaptent suite à la variation de la vitesse.

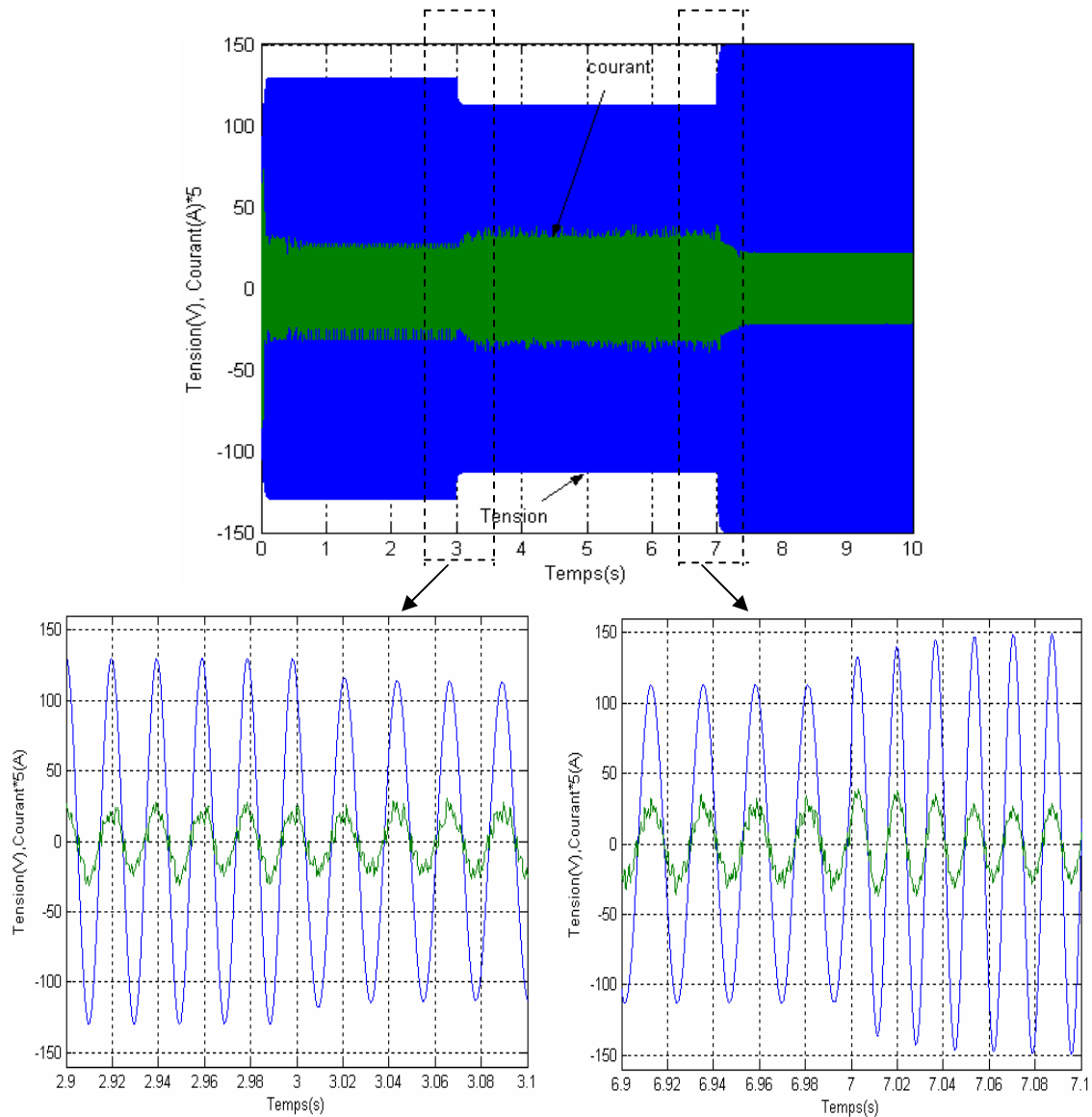


Figure (4.31) : Stratégie de commande d'une GSAP associée à un redresseur

4.4 Conclusion

Dans ce 4^{ème} chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la voilure, de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur commandé). La loi commande du système a été aussi détaillée. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés et ont permis de valider les modèles mathématiques du système éolien.

Chapitre - 5 :

Application du système hybride

Eolienne- photovoltaïque

5.1 Introduction

Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne, pour application aux zones éloignées. Cette étude porte sur la modélisation et la simulation du couplage des deux chaînes en parallèle. Certains dimensionnements ont été empiriques alors que certains points sont à étudier dans ce couplage, tel le niveau de la tension de la batterie pour deux applications:

- la 1^{ère} application concerne un système de pompage hybride comportant un générateur éolien-PV, un moteur à courant continu sans balais (*BLDCM*) et une pompe centrifuge (couplage direct) afin d'avoir une certaine quantité d'eau pompée ; on présente ensuite la modélisation des différents éléments constituant le système et le modèle final de l'ensemble de la chaîne.
- la 2^{ème} application porte sur un réseau alternatif triphasé pour alimenter une charge alternative isolée ; ce qui nécessite un onduleur de tension pour la conversion *CC/AC*.

5.2 Système de conversion d'énergie hybride

Une fois tous les modèles élémentaires validés, nous avons effectué le couplage des deux chaînes, comme présenté sur la figure (5.1). Certains aspects dimensionnels ont été empiriques ; d'autres points sont à étudier dans ce couplage, comme le niveau de la tension de la batterie.

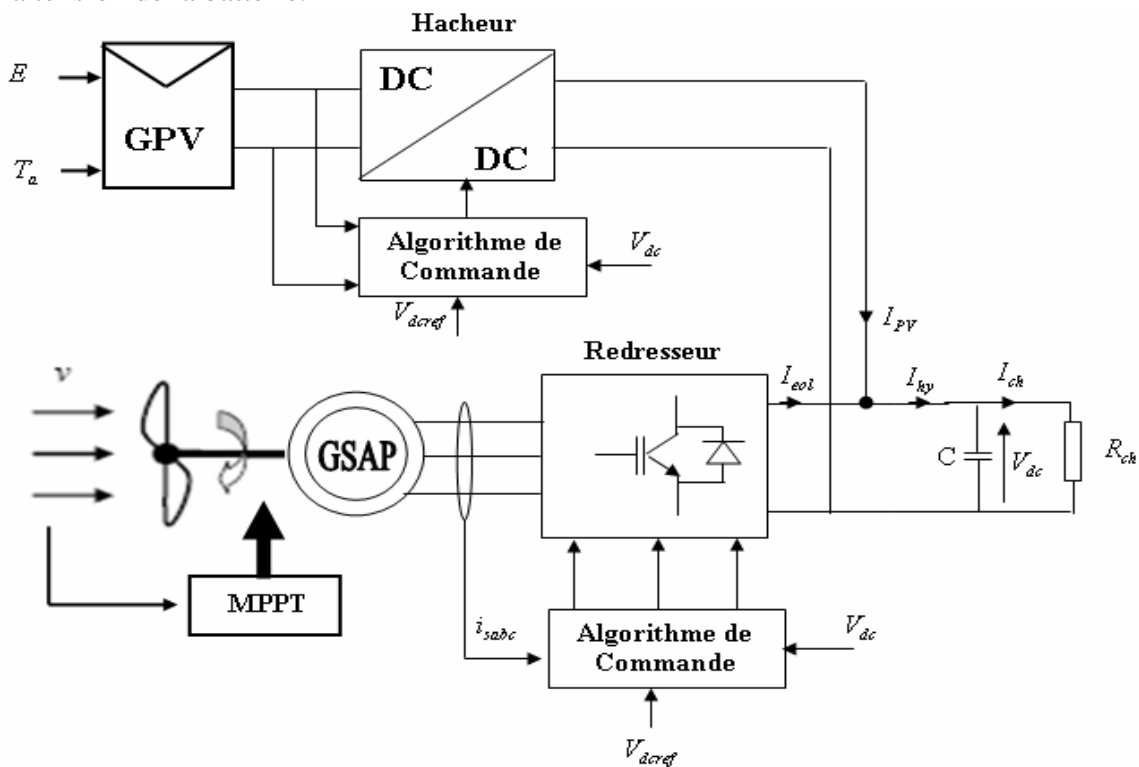


Figure (5.1) : Schéma de principe du système hybride

Ce système est caractérisé par 2 sources énergétiques (éolienne et photovoltaïque) ; la turbine éolienne (*WT*) entraîne un générateur à aimants permanents (*GSAP*) qui lui même est connecté à la charge par un redresseur commandé. Les cellules photovoltaïques (*GPV*) sont connectées à la charge par un convertisseur *DC/DC* commandé en MPPT (Maximal Power Point Tracking). Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme indiqué figure (5.1). Il est nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la figure (5.2) est présenté en détail le bus à courant continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur *C* connecté aux deux systèmes.

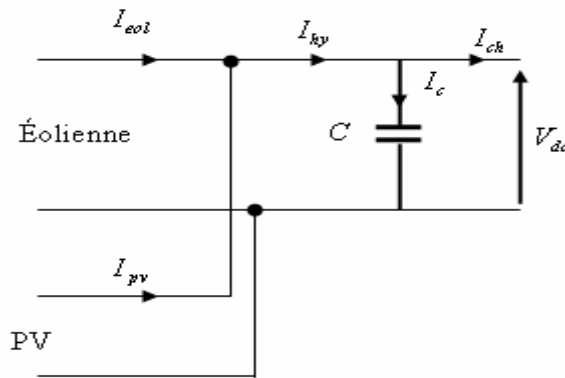


Figure (5.2) : Modèle du bus à courant continu

A partir de la figure (5.2), en peut écrire l'équation suivante:

$$I_{hy} = I_{eol} + I_{PV} = I_c + I_{ch} \quad (5.1)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \\ I_{ch} = \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (5.2)$$

L'algorithme de commande utilisé pour la régulation de la tension aux bornes de deux systèmes est basé sur deux boucles de régulation (figure (5.3)) en cascade : une régulation du courant hybride par hystérésis (comme présenté aux chapitres 3 et 4) et une boucle de régulation de la tension V_{dc1} . La fonction de transfert est la suivante:

$$F(s) = \frac{V_{dc1}^2(s)}{I_{hy}(s)} = \frac{V_{dc1}}{C_s + \frac{1}{R_{ch}}} \quad R_{ch} \gg \Rightarrow F(s) \approx \frac{V_{dc1}}{C \cdot s} \quad (5.3)$$

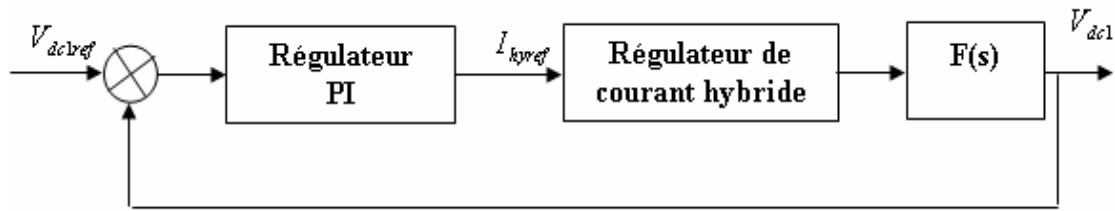


Figure (5.3) : Régulation de la tension du bus

Le régulateur de tension choisi est de type PI :

$$H_{pl}(s) = K_3 \left(1 + \frac{1}{T_3 \cdot s} \right) \quad (5.4)$$

La fonction de transfert corrigée en boucle ouverte s'écrit :

$$H_{bo}(s) = K_3 \left(1 + \frac{1}{T_3 s} \right) \left(\frac{V_{dc}}{Cs} \right) \quad (5.5)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donc :

$$H_{bf}(s) = \frac{H_{bo}(s)}{1 + H_{bo}(s)} \quad (5.6)$$

$$H_{bf}(s) = \frac{1 + T_3 s}{\frac{CT_3}{2K_3 V_{pv}} s^2 + T_3 s + 1}$$

Par identification entre le dénominateur $Den(s)$ de la fonction de transfert en boucle fermée et la fonction de transfert suivante :

$$Den(s) = \frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1$$

On trouve:

$$K_3 = \frac{C \omega_{Bp}}{V_{pv}} \text{ et } T_3 = \frac{2\xi}{\omega_{Bp}}$$

Typiquement on prend:

$$\omega_{Bp} = \frac{\omega_{dec}}{10} \text{ et } \xi = 0.7.$$

5.2.1 Résultats de simulations

Les figures (5.4 et 5.5) montrent respectivement les résultats de simulation de la tension et la puissance du système hybride (éolienne - photovoltaïque) pour des conditions météorologiques moyennes (vitesse de vent 15m/s, éclairement 1000W/m2 et température 25°C). La puissance du système hybride déterminée au cours de la

mission est égale à la somme de la puissance éolienne extraite de l'énergie du vent et la puissance du générateur photovoltaïque extraite de l'énergie solaire. Pour tester le comportement du système hybride soumis à des variations climatiques (vent et éclairage), nous avons utilisé un profil du vent représenté dans la figure (5.6.a) avec un éclairage constant de valeur moyenne 800W/m². La figure (5.6.b) représente l'évolution de la tension du bus de la sortie de système hybride. Le deuxième test porte sur le système soumis à un profil d'éclairage (figure(5.7.a)) et un profil de température moyenne de 25°C avec une vitesse moyenne du vent 15m/s. La figure (5.7.b) montre la tension du bus continu du système hybride. On constate pour ces variations climatiques que la tension est bien réglée et les perturbations ne dépassent pas 12% avec un temps de réponse de l'ordre de 0.3s.

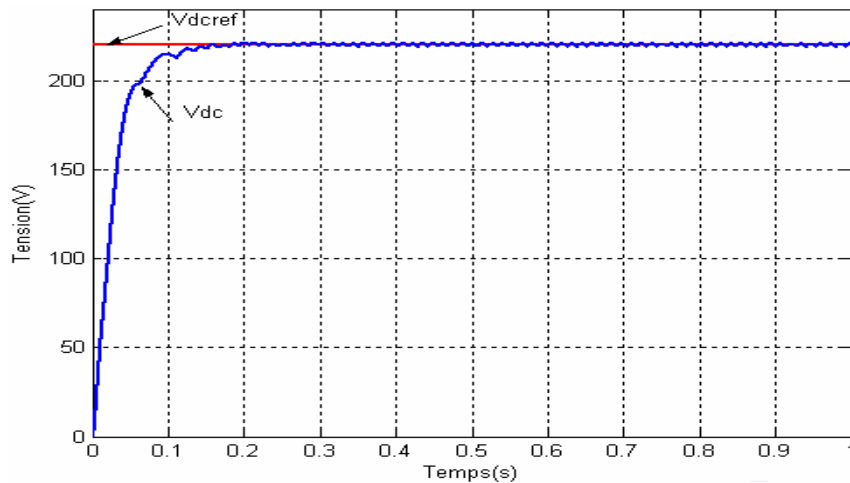


Figure (5.4) : La tension de bus continu du système hybride en fonction du temps

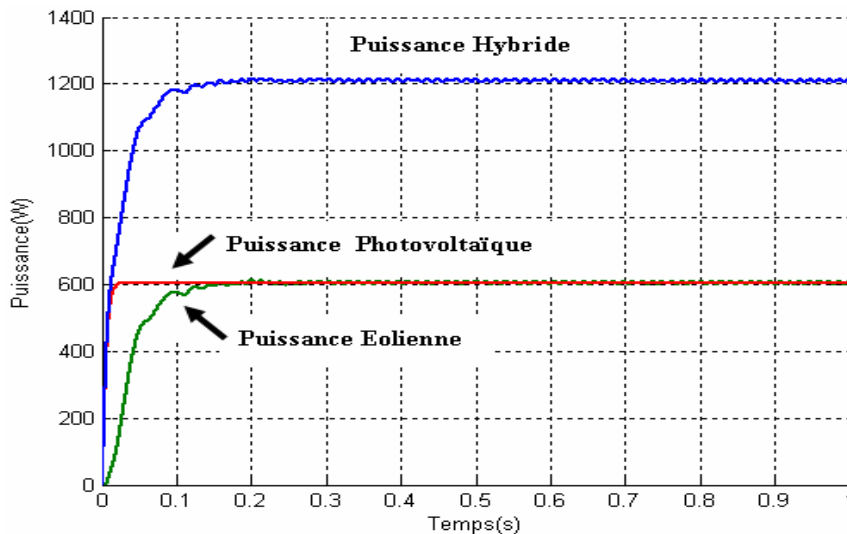


Figure (5.5) : La puissance du système hybride en fonction du temps

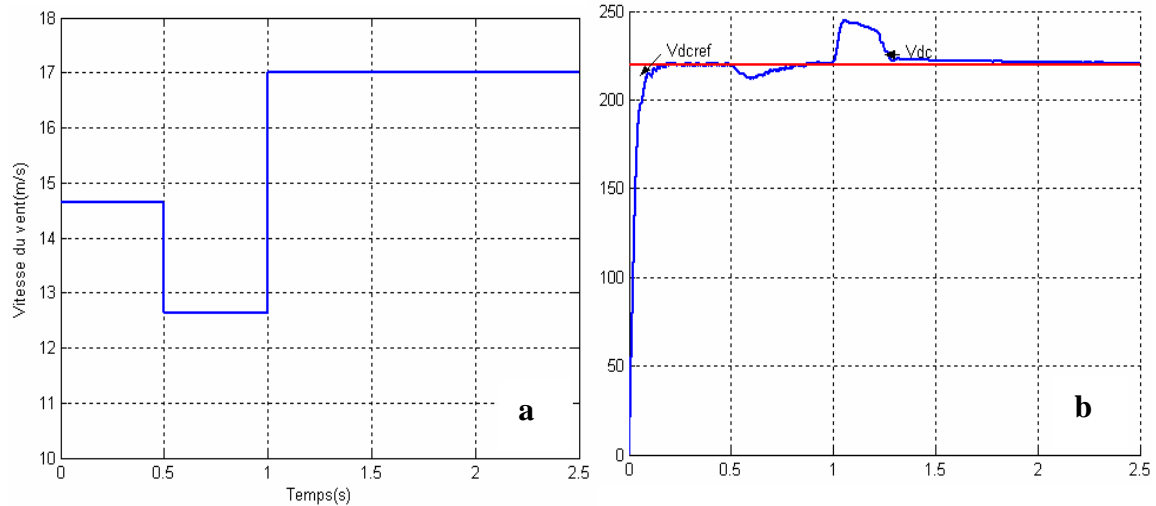


Figure (5.6) : La tension du bus continu du système hybride en fonction du temps
(pour une variation de la vitesse du vent)

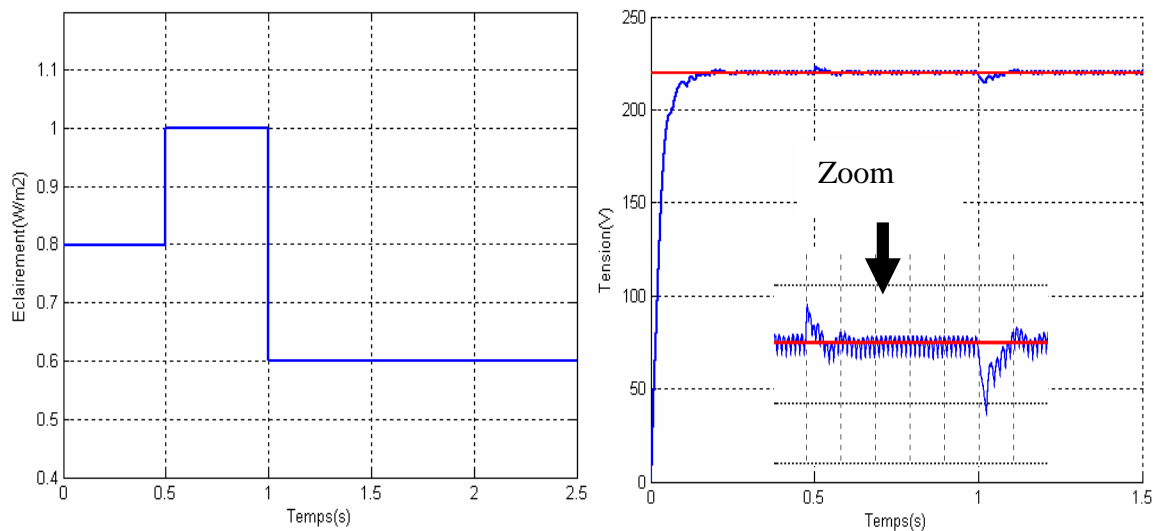


Figure (5.7) : La tension du bus continu du système hybride en fonction du temps
(pour une variation de l'éclairement)

5.3 Application du système hybride au pompage d'eau

5.3.1 Description du système

Aujourd'hui, les systèmes énergétiques hybrides (tels l'éolien-photovoltaïque) ont connu une croissance très importante vu leurs multiples atouts ; ce qui a permis de réduire les coûts et d'améliorer les rendements de ces systèmes.

Dans un grand nombre d'applications, l'énergie hybride est tout simplement la solution la plus rentable. Parmi les applications qui nécessitent l'utilisation de l'énergie hybride (éolienne-photovoltaïque), on peut citer les systèmes isolés alimentant des résidences éloignées et les systèmes de pompage d'eau.

Le pompage d'eau hybride qui permet d'obtenir des débits nettement plus importants, apparaît comme une solution raisonnable du point de vue technique et économique [72-73].

Le schéma général du couplage direct d'un système de pompage éolien-photovoltaïque peut être représenté par la figure (5.8).

Il est constitué principalement de :

- un générateur hybride (éolienne-photovoltaïque) qui alimente le moteur.
- une motopompe qui comprend deux parties :
 - un moteur électrique, immergé ou hors d'eau, à courant alternatif ou continu ;
 - une pompe hydraulique en général centrifuge.

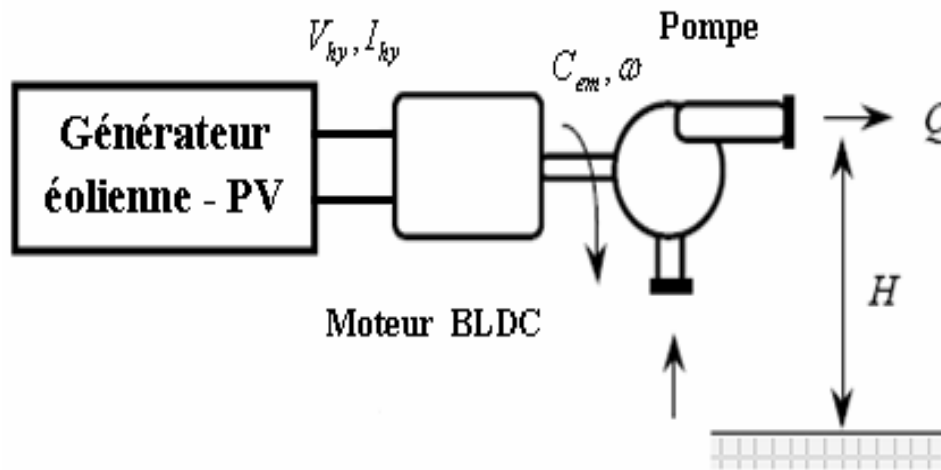


Figure (5.8) : Système de pompage hybride d'eau

5.3.2 Types de moteurs utilisés

Le moteur électrique est le deuxième élément dans le système de pompage hybride d'eau ; c'est la machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou à courant alternatif [38]. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur hybride en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu sans balais (BLDCM) peut sembler, de prime abord, plus intéressant. Les moteurs à commutation électronique (sans balais) utilisent un circuit électronique pour inverser le courant circulant dans le stator.

Ces moteurs ne requièrent pas autant de maintenance, mais le circuit électronique peut être une cause de problèmes et doit être conçu pour un environnement difficile.

5.3.3 Type de pompe utilisée

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Dans le domaine du pompage, les pompes les plus utilisées sont les pompes centrifuges conçues pour une hauteur manométrique totale relativement fixe. Le débit de cette pompe varie proportionnellement à la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle au débit fois la hauteur manométrique, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une hauteur manométrique totale donnée pour obtenir un débit de départ non nul [38,74].

5.3.3.1 Constitution d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge se compose de :

- un distributeur, sorte de tubulure profilée, qui sert à conduire l'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe ;
- une roue constituée par noyau porté par un arbre et muni d'aubes tournant à de deux coquilles formant le corps de la pompe.

La théorie de fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique de la veine fluide est augmentée, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement cinétique. Cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenu dans une pièce placée à l'intérieur de la roue appelée limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent [74].

- 1- Cône divergent
- 2- Axe de la pompe
- 3- Corps de la pompe
- 4- Aube
- 5- Limaçon
- 6- Roue

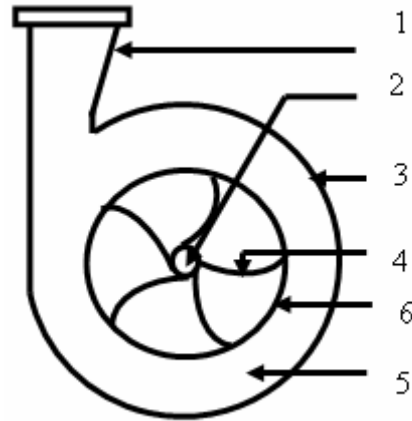


Figure (5. 9) : Construction d'une pompe centrifuge

5.4 Présentation du modèle mathématique de la motopompe

5.4.1 Modèle du moteur

Le moteur à courant continu à aimants permanents sans balais considéré dans cette étude se caractérise par les équations suivantes :

$$V_m = 2I_m R_{ph} + 2e_{ph}$$

$$V_m = 2I_m R_{ph} + 2K_m \omega_m \quad (5.7)$$

$$e_m = 2K_m \omega_m \quad (5.8)$$

$$C_{em} = K_T I_m. \quad (5.9)$$

Où :

V_m : La tension d'alimentation du moteur.

R_m : La résistance d'induit du moteur.

ω_m : La vitesse de rotation.

C_{em} : Le couple électromagnétique.

$K_m ; K_T$: Les constantes du moteur.

5.4.2 Modèle de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge est caractérisé par une surface ayant pour équation:

$$F(H, Q, \omega) = 0 \quad (5.10)$$

Ce système de représentation à trois dimensions étant assez compliqué, on préfère adopter un système à deux dimensions. On considère l'une des trois variables H, Q, ω comme paramètre ; en général, on suppose la vitesse constante [75-76].

5.4.2.1 Caractéristique hauteur-débit

La hauteur H créée par la pompe en fonction du débit Q est donnée par:

$$H = H - \Delta H \quad (5.11)$$

Où ΔH sont les pertes par frottement ; ces pertes sont exprimées par :

$$\Delta H = K_{fr} Q^2 \quad (5.12)$$

K_{fr} : Coefficient de perte de charge relatif à la pompe.

La modification de la caractéristique $H(Q)$ pour d'autres vitesses d'entraînement s'effectue par l'utilisation des lois de similitude ci-après [76]:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$\frac{H}{H_n} = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

La relation liant la hauteur d'eau au débit de la pompe est donnée par :

$$H = C_1 \times \omega^2 - C_2 \omega \times Q - C_3 \times Q^2 \quad (5.13)$$

Où : C_1, C_2 et C_3 sont des constantes liées à la géométrie de la pompe.

5.4.2.2 Caractéristique couple-vitesse

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple nécessaire (utile) pour l'entraînement de la pompe proportionnel au carré de sa vitesse, découvert par BRAUNSTEIN et KORNFELD en 1981 [75].

$$C_p = K_p \omega_m^2 \quad (5.14)$$

Où :

C_p : Le couple utile pour l'entraînement de la pompe.

K_p : Constante qui dépend de la pompe.

5.4.3 Modèle de la canalisation de refoulement

La hauteur totale d'eau en tenant compte des différentes pertes est donnée par [77]:

$$H_c = H_g + \Delta H_c \quad (5.15)$$

Où : H_g est la hauteur statique d'eau

ΔH_c : représente les différentes pertes de charge en hauteur dans la conduite ; elles dépendent de la géométrie de la canalisation et du débit d'eau.

Ces pertes sont données par:

$$\Delta H_c = \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 g} \quad (5.16)$$

Avec:

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

l : Longueur de la canalisation.

d : Diamètre de la canalisation.

ζ : Le coefficient des pertes de charges locales dont la valeur change suivant la nature de l'accessoire (vanne, coude ...).

La figure (5.10) illustre le tracé du faisceau de courbes $H(Q)$ et la caractéristique $H_c(Q)$ de la canalisation de refoulement pour des vitesses données. L'intersection entre les deux caractéristiques représente le point de fonctionnement de la pompe.

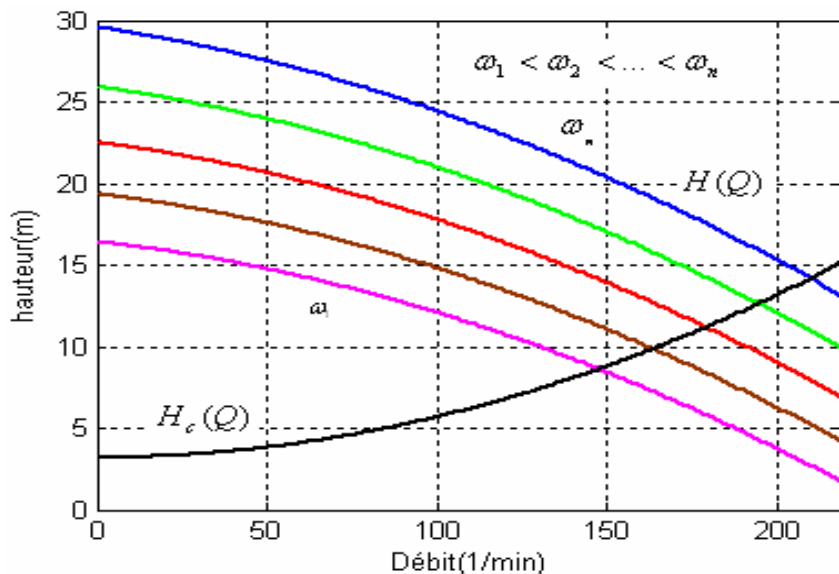


Figure (5.10) : Courbes $H(Q)$ de la pompe centrifuge et la caractéristique de la canalisation

5.5 Simulation du système de pompage d'eau

5.5.1 Présentation du modèle mathématique

Quand le groupe motopompe est alimenté par énergie hybride, on a les égalités suivantes :

$$V_{hy} = V_m \quad (5.17)$$

$$I_{hy} = I_m \quad (5.18)$$

$$C_m = C_p \quad (5.19)$$

5.5.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation du système de pompage éolien-photovoltaïque utilisant le moteur à courant continu à aimants permanents, avec un couplage direct, représentent respectivement la variation du débit de la pompe en fonction de la vitesse du moteur (figure (5.11)), le débit de la pompe en fonction de courant du moteur (figure (5.12)), la variation de la hauteur en fonction du débit de la pompe (figure(5.13)) et de la variation de la vitesse du moteur, le débit de la pompe en fonction du temps (figure (5.14)).

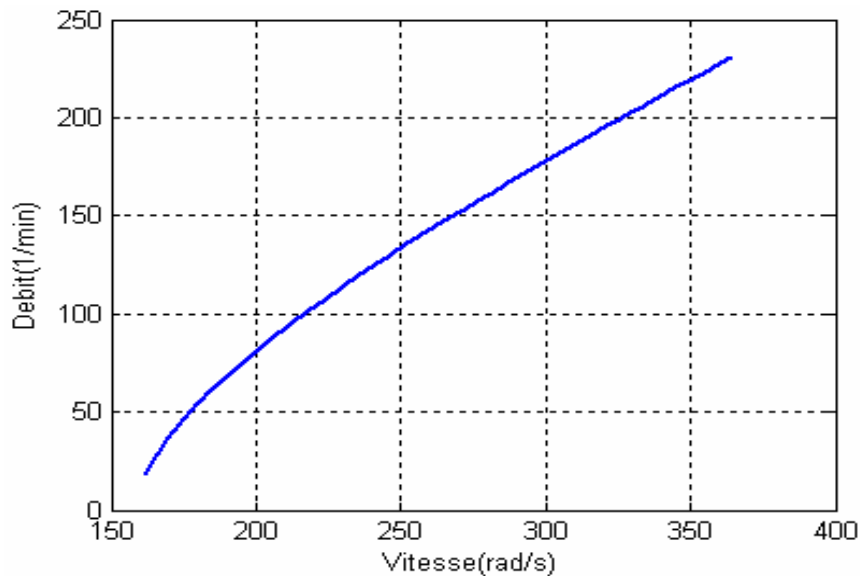


Figure (5.11) : Variation du débit de la pompe fonction de la vitesse du moteur

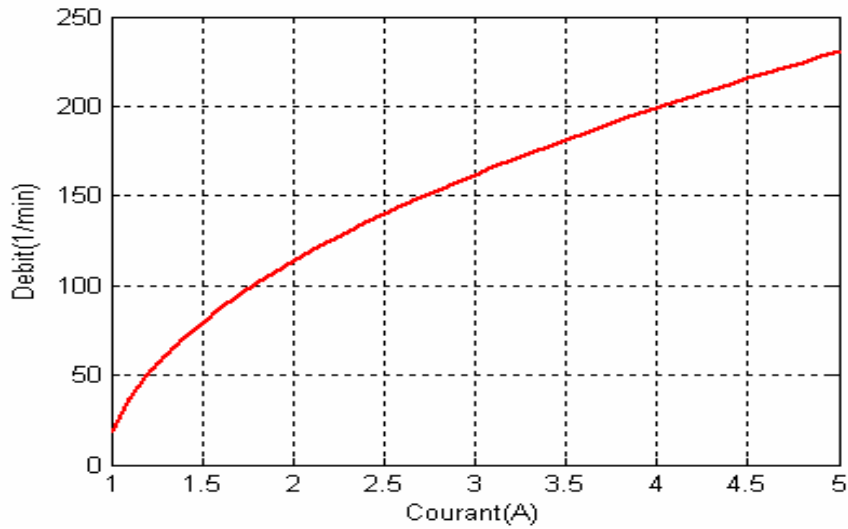


Figure (5.12) : Variation du débit de la pompe fonction du courant hybride

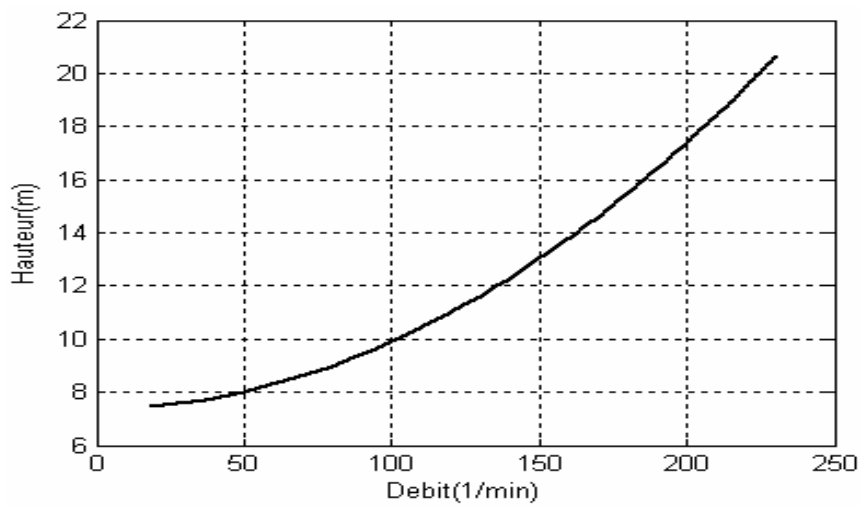


Figure (5.13) : Variation de hauteur en fonction du débit de la pompe

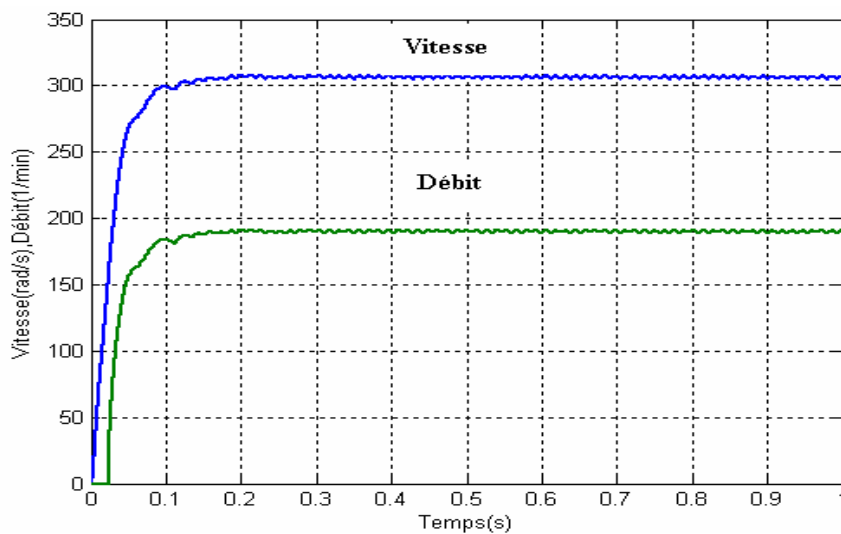


Figure (5.14) : La vitesse du moteur et le débit de la pompe en fonction du temps

5.6 Connexion du générateur hybride sur le réseau

Comme possible structure d'intégration des ressources renouvelables, un réseau hybride de type résidentiel. L'idée consiste à installer des petits systèmes de génération d'origine renouvelable (systèmes éoliens et photovoltaïques) sur les toits, les jardins et les zones vertes de la zone résidentielle [78]. Le modèle général d'un générateur basé sur un onduleur de tension considéré dans cette étude est représenté dans la figure (5.15). Il contient trois éléments principaux : la source *DC*, l'onduleur triphasé et le filtre de connexion au réseau. La source *DC* intègre la source primaire (générateur éolien, système photovoltaïque). L'onduleur qui assure la conversion *DC/AC* est un onduleur de tension triphasé commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (*MLI*). Le filtre de connexion au réseau est un filtre *LC* qui sert à minimiser les harmoniques de commutation. Deux types de réseaux électriques peuvent être considérés:

- un réseau comportant au moins une source parfaite de tension triphasé, que l'on appellera réseau actif.
- et un réseau composé uniquement de charges isolées raccordées entre-elles électriquement sans source d'énergie, que l'on appellera réseau passif et qui constituera l'objet de mon application.

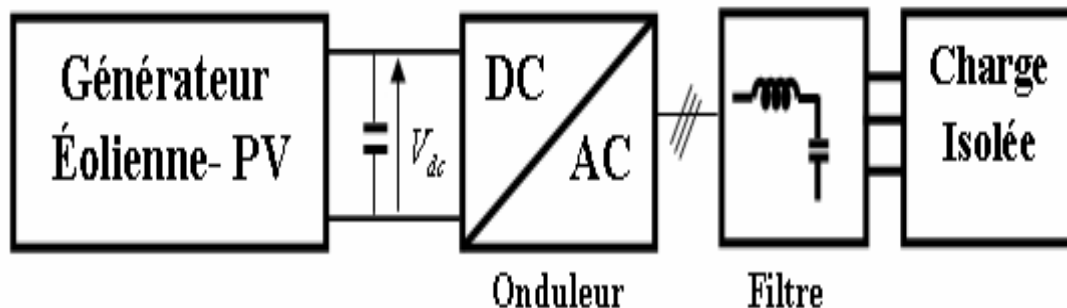


Figure (5.15) : Modèle d'un générateur hybride (éolien-photovoltaïque) connecté au réseau à travers un onduleur de tension

5.6.1 Modélisation de filtre LC

Le modèle d'onduleur de tension est détaillé au chapitre 4. Le filtre *LC* représenté à la figure (5.16) est régi par les équations de tension et de courant explicitées ci-dessous [79].

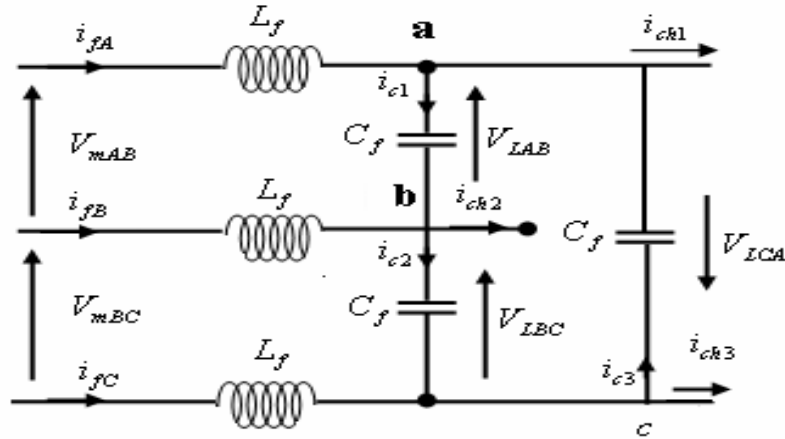


Figure (5.16) : Schéma du filtre LC triphasé

A partir de la figure (5.16), on applique la première loi de Kirchoff's (loi des nœuds) aux points a, b, c ; on obtient les équations suivantes:

Nœud a:

$$i_{fA} + i_{c3} = i_{c1} + i_{ch1} \Rightarrow i_{fA} + C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} = C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} + i_{ch1} \quad (5.20)$$

Nœud b:

$$i_{fB} + i_{c1} = i_{c2} + i_{ch2} \Rightarrow i_{fB} + C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} = C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} + i_{ch2} \quad (5.21)$$

Nœud c:

$$i_{fC} + i_{c2} = i_{c3} + i_{ch3} \Rightarrow i_{fC} + C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} = C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} + i_{ch3} \quad (5.22)$$

Avec:

$$\begin{aligned} i_{c1} &= C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} \\ i_{c2} &= C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} \\ i_{c3} &= C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} \end{aligned} \quad (5.23)$$

La soustraction (5.20) de (5.21) en obtient:

$$\begin{aligned} i_{fA} - i_{fB} + C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) + i_{ch1} - i_{ch2} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= -i_{fA} + i_{fB} + i_{ch1} - i_{ch2} \end{aligned} \quad (5.24)$$

La soustraction (5.21) de (5.22) en obtient:

$$\begin{aligned} i_{fB} - i_{fC} + C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) + i_{ch2} - i_{ch3} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LCA}}{dt} - 2 \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) &= -i_{fB} + i_{fC} + i_{ch2} - i_{ch3} \end{aligned} \quad (5.25)$$

La soustraction (5.22) de (5.20) en obtient:

$$\begin{aligned} i_{fC} - i_{fA} + C_f \left(\frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) + i_{ch3} - i_{ch1} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) &= -i_{fC} + i_{fA} + i_{ch3} - i_{ch1} \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\text{Avec : } V_{LAB} + V_{LBC} + V_{LCA} = 0 \quad (5.27)$$

A partir de les équations (5.24 à 5.27) on obtient :

$$\frac{dV_{LAB}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fAB} - \frac{1}{3C_f} i_{LAB} \quad (5.28)$$

$$\frac{dV_{LBC}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fBC} - \frac{1}{3C_f} i_{LBC} \quad (5.29)$$

$$\frac{dV_{LCA}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fCA} - \frac{1}{3C_f} i_{LCA} \quad (5.30)$$

Avec:

$$i_{fAB} = i_{fA} - i_{fB}$$

$$i_{fBC} = i_{fB} - i_{fC}$$

$$i_{fCA} = i_{fC} - i_{fA}$$

$$i_{LAB} = i_{ch1} - i_{ch2}$$

$$i_{LBC} = i_{ch2} - i_{ch3}$$

$$i_{LCA} = i_{ch3} - i_{ch1}$$

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff's (loi des mailles) nous obtenons:

$$\frac{di_{fAB}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LAB} + \frac{1}{L_f} V_{mAB} \quad (5.31)$$

$$\frac{di_{fBC}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LBC} + \frac{1}{L_f} V_{mBC} \quad (5.32)$$

$$\frac{di_{fCA}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LCA} + \frac{1}{L_f} V_{mCA} \quad (5.33)$$

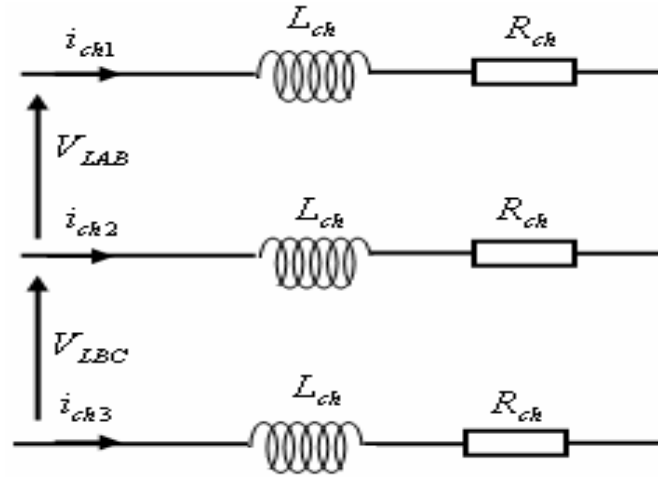


Figure (5.17) : Schéma de l'impédance réseau

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff's (loi des mailles) de la figure (5.17), nous obtenons:

$$V_{LAB} = L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} + R_{ch} i_{ch1} - L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} - R_{ch} i_{ch2} \quad (5.34)$$

$$V_{LAB} = L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} + R_{ch} i_{ch2} - L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} - R_{ch} i_{ch3} \quad (5.35)$$

$$V_{LCA} = L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} + R_{ch} i_{ch3} - L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} - R_{ch} i_{ch1} \quad (5.36)$$

Les équations (5.34 à 5.36) peuvent être réécrites ainsi:

$$\frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LAB} + \frac{1}{L} V_{LAB} \quad (5.37)$$

$$\frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LBC} + \frac{1}{L} V_{LBC} \quad (5.38)$$

$$\frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LCA} + \frac{1}{L} V_{LCA} \quad (5.39)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{3C_f} I_f - \frac{1}{3C_f} I_L \quad (5.40)$$

$$\frac{dI_f}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_L + \frac{1}{L_f} V_f \quad (5.41)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L} V_L + \frac{R}{L} I_L \quad (5.42)$$

Avec

$$V_L = [V_{LAB} V_{LBC} V_{LCA}]^T, I_f = [i_{fAB} i_{fBC} i_{fCA}]^T, V_f = [V_{fAB} V_{fBC} V_{fCA}]^T.$$

5.6.2 Structure de commande

Dans le cas d'une connexion à un réseau composé uniquement des charges isolées, l'onduleur doit se comporter comme une source de tension triphasée appliquant de ce fait une onde de tension sinusoïdale d'amplitude V et de fréquence f à la borne de chaque charge. Le rôle du filtre LC est donc double puisqu'en plus d'atténuer les harmoniques engendrées par le convertisseur, il permettra à l'onduleur de réaliser la source de tension triphasée grâce aux condensateurs en asservissant les tensions à leurs bornes.

Le convertisseur est commandé en tension. Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire et, en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple:

- si $V_{ref} > V_T$ le transistor supérieur du bras de pont conduit,
- si $V_{ref} < V_T$ le transistor inférieur du bras de pont conduit

Où V_{ref} représente une des trois tensions de référence et V_T représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse.

La commande MLI présente l'avantage d'une fréquence constante de commutation qui est fixée par la fréquence de l'onde porteuse.

Le schéma simulink pour ce type d'onduleur est présenté dans la figure (5.18).

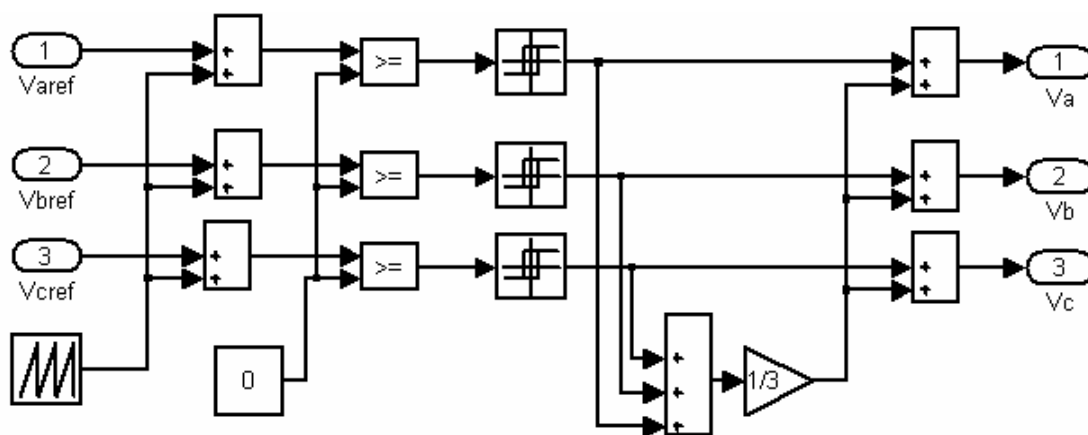


Figure (5.18) : Onduleur de tension avec une onde porteuse

Dans la figure (5.19) on voit que l'amplitude de V_T est unitaire. L'amplitude de l'onde de référence V_{ref} peut prendre des valeurs comprises entre $[0,1]$. Sachant que les tensions polaires de l'onduleur peuvent prendre seulement deux valeurs qui sont différentes de zéro ($\pm \frac{V_{dc}}{2}$).

5.6.3 Résultats de simulations

La figure (5.19) montre le principe de la commande MLI et l'allure des tensions de l'onduleur avec une enveloppe de tensions ; sur cette figure V_h la tension homopolaire est exprimée par:

$$V_h = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}).$$

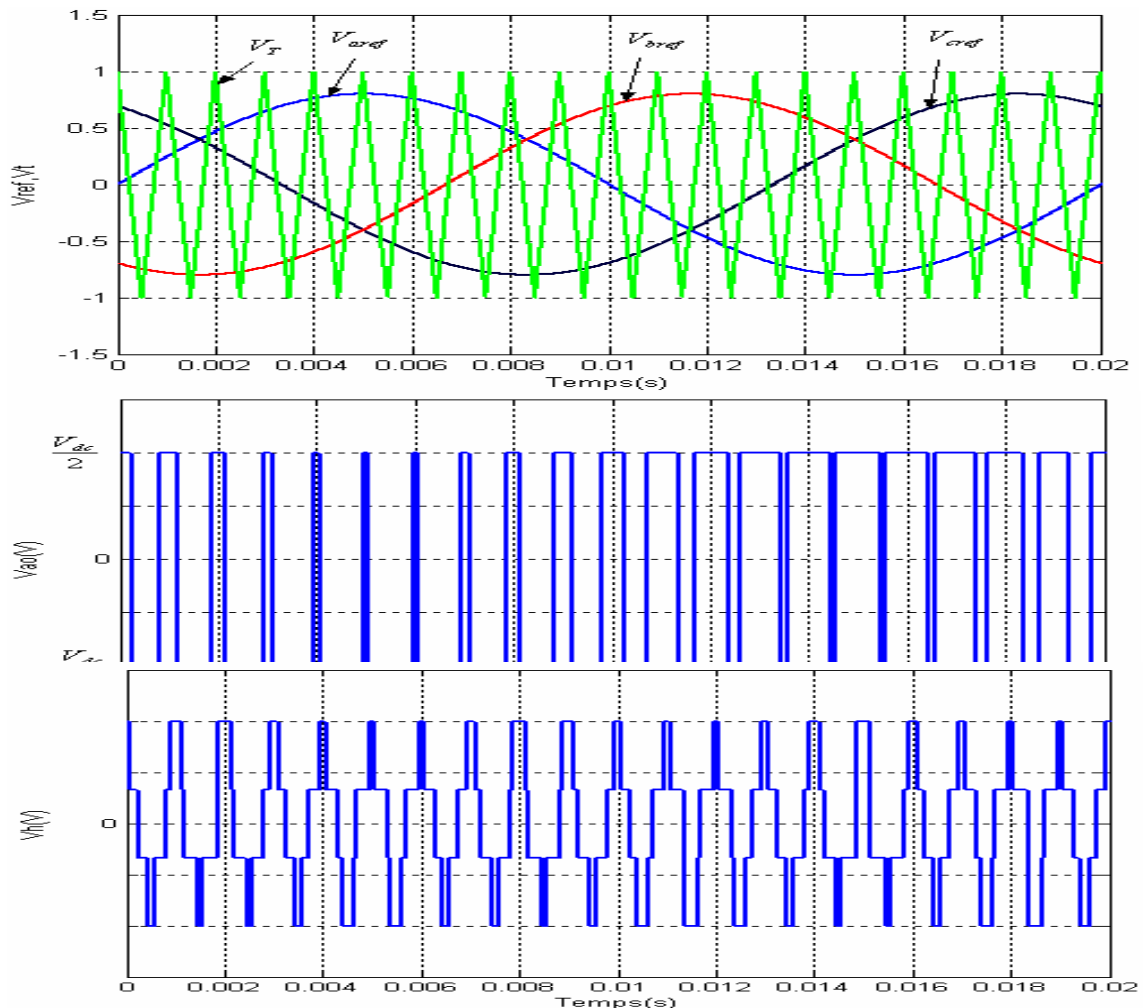


Figure (5.19) : Principe de la commande MLI et enveloppe de tension

Les figures (5.20 à 5.23) montrent respectivement les tensions modulées ($V_{mAB}, V_{mBC}, V_{mCA}$), les courants en sortie de convertisseur ($i_{fAB}, i_{fBC}, i_{fCA}$), les tensions simples de la charge (V_{LA}, V_{LB}, V_{LC}) et les courants en sortie du filtre ($i_{ch1}, i_{ch2}, i_{ch3}$). La figure (5.24) montre le cas où le courant de charge est en phase avec sa force électromotrice.

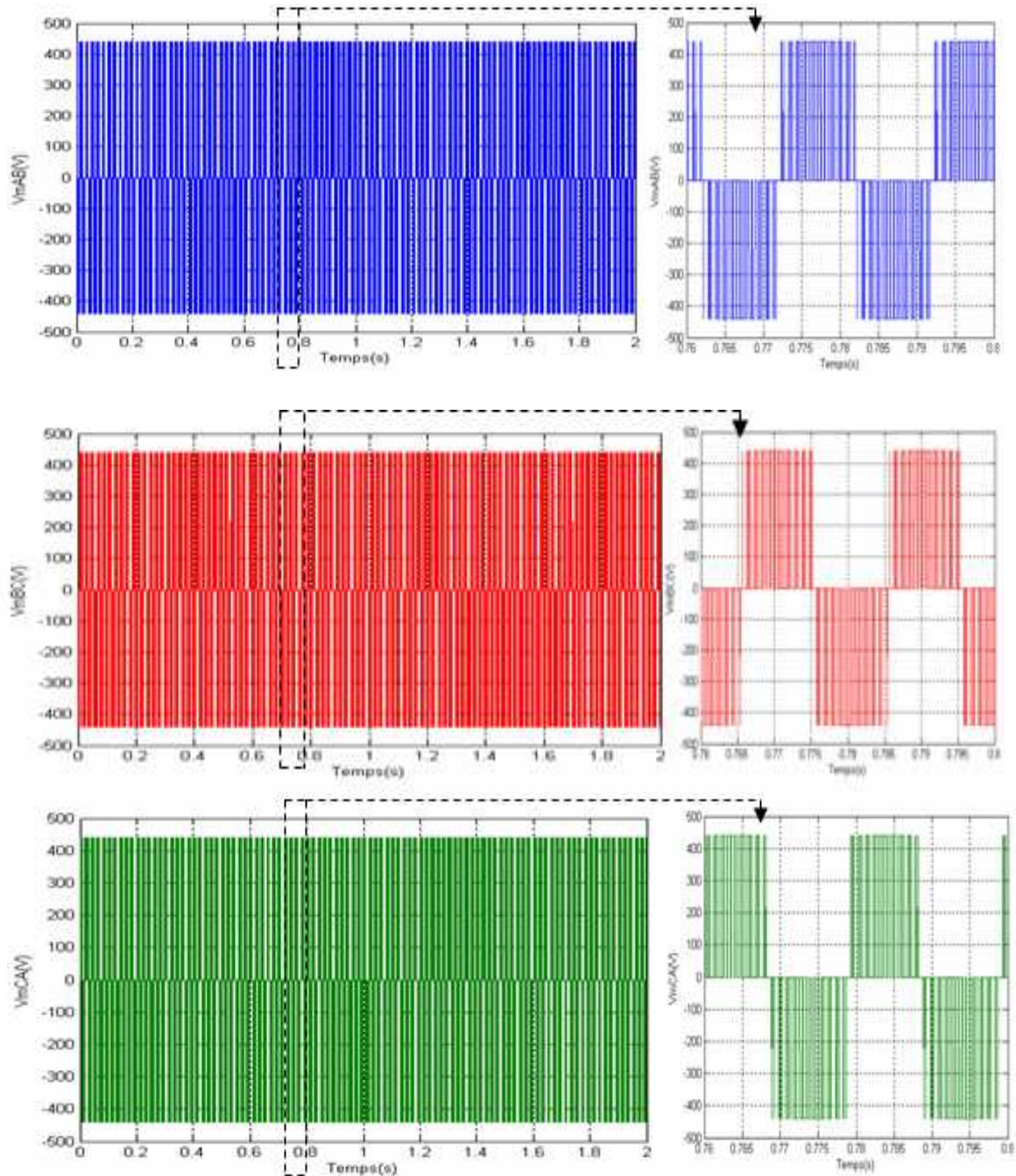


Figure (5.20) : Les tension modulées ($V_{mAB}, V_{mBC}, V_{mCA}$)

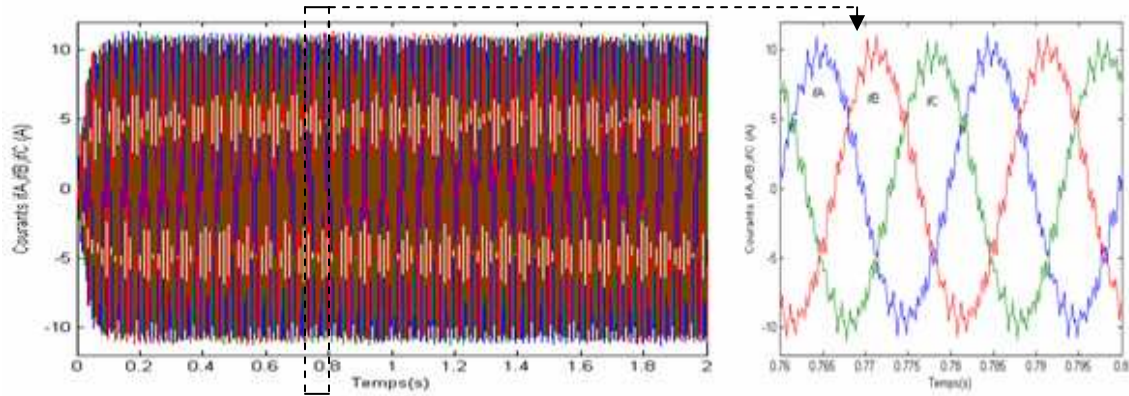


Figure (5.21) : Les courants en sortie de l'onduleur ($i_{fAB}, i_{fBC}, i_{fCA}$)

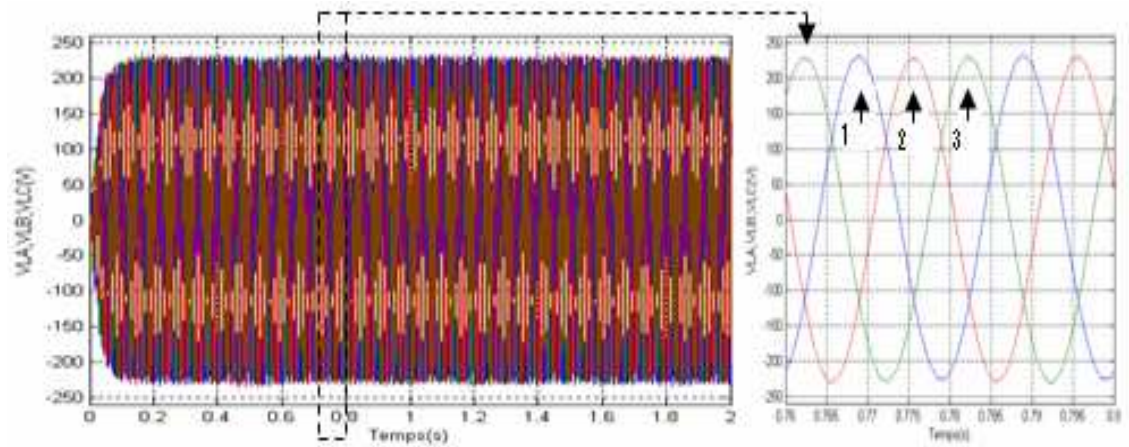


Figure (5.22) : Les tensions simples de la charge (1- V_{LA} , 2- V_{LB} , 3- V_{LC})

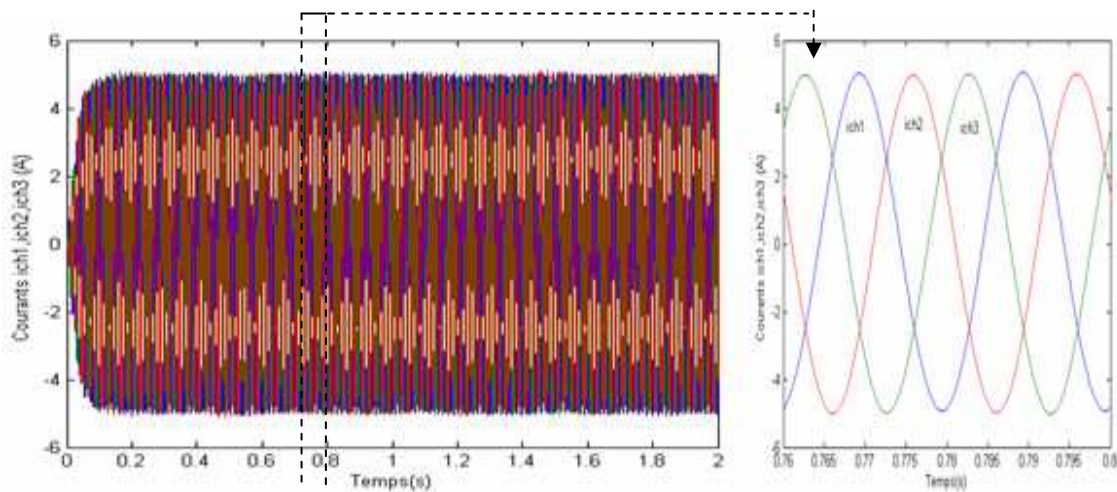


Figure (5.23) : Les courants en sortie de filtre ($i_{ch1}, i_{ch2}, i_{ch3}$)

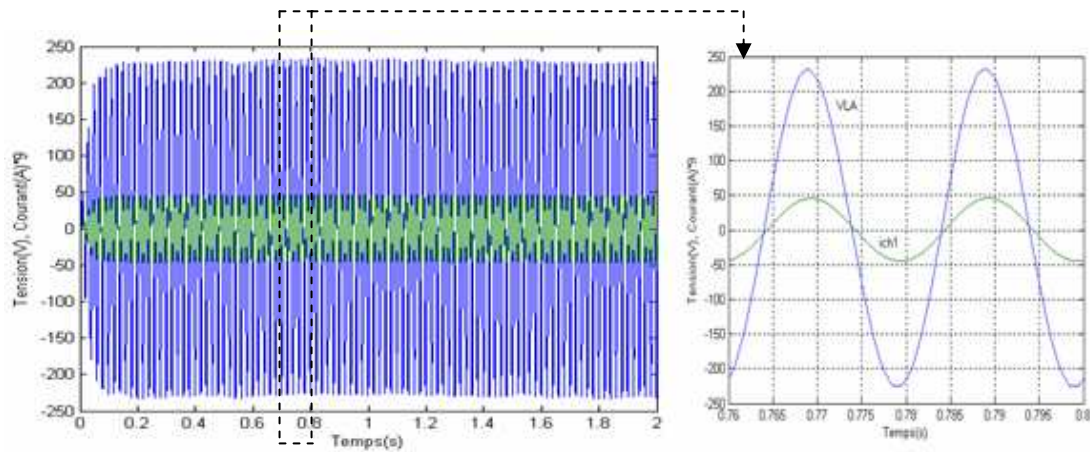


Figure (5.24) : La tension et courant de la charge

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un système d'énergie hybride constitué par une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques. Ces sources se connectent sur un bus continu qui permet deux applications : (i) système de pompage hybride ou (ii) raccordé au réseau. Dans un premier temps, nous avons commencé l'étude par le modèle du générateur hybride, ensuite une présentation du modèle pour chaque élément constituant la chaîne hybride afin d'avoir un modèle complet de l'ensemble. Les résultats des différentes simulations réalisées sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent, d'une façon générale, l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'électricité décentralisée, à partir de ressources renouvelables mixtes (éolienne et photovoltaïque), pour des applications en sites isolés. L'objectif premier est d'effectuer un état de l'art de la question, d'évaluer les potentialités de chaque structure et de proposer des solutions aux nouvelles contraintes imposées aux générateurs éoliens et photovoltaïques en termes de qualité d'énergie.

Les machines à aimants permanents apportent une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables ; ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques à savoir : durée de vie élevée, rendement élevé, maintenance réduite,...etc.

La structure de MSAP à intégrer dans le système de conversion d'énergie éolienne envisagé a été dimensionnée selon une approche analytique semblable à celle utilisée pour les machines asynchrones. Une méthode numérique par élément finis a permis le calcul du champ magnétique dont la valeur est très voisine de celle trouvée analytiquement (écart de l'ordre de 5%), ce qui valide nos modèles.

Par la suite, des modèles de simulation pour les sources éolienne et photovoltaïque ainsi que pour les éléments d'interconnexion ont été développés sous environnement MATLAB/Simulink.

Pour la chaîne éolienne, on a représenté le modèle avec tous ses éléments: rotor éolien, générateur à aimants permanents et le redresseur commandé. Pour la maximisation de l'énergie contenue dans le vent, la commande adoptée pour la chaîne de conversion éolienne a été une commande indirecte de couple pour générer un courant de référence lié à la courbe de puissance maximale. La technique de recherche du point optimal de puissance MPPT adoptée ici est basée sur l'architecture et la connaissance de la caractéristique de la voilure (via la vitesse réduite λ).

Concernant le générateur photovoltaïque, nous avons pu simuler correctement les caractéristiques courant-tension données par les constructeurs de panneaux solaires à partir d'une approximation polynomiale, prenant en compte les variations de l'éclairement et de la température. L'approche adoptée a permis d'améliorer diverses parties de la chaîne en commençant par l'assemblage des cellules, les protections à mettre en oeuvre pour assurer une grande durée de vie du générateur, le choix et la mise

en oeuvre de commandes MPPT performantes ainsi que l'étude et la conception d'étages d'adaptation à haut rendement adaptés aux contraintes de l'énergie solaire

L'utilisation de ce type d'énergie hybride est très intéressant en site isolé. Le pompage d'eau est une des applications envisagée et étudiée ici avec une charge passive. Les résultats de simulation obtenus ont permis de montrer un bon comportement énergétique du système complet.

Comme perspectives, nous pouvons, par exemple, envisager une réalisation pratique puis une implantation en site isolé du système hybride proposé.

Bibliographies

- [1] B. Multon, " Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [2] C. Alonso, " Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", Mémoire en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger les recherches, université Paul Sabatier Toulouse III, Décembre 2003.
- [3] O. Gergaud, " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan 2002.
- [4] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [5] Recherche ECRIN entreprise, " L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", rapport de synthèse, mai 2002.
- [6] www.ets-net.org.
- [7] A. Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [8] J.F. Walker, N. Jenkins, "Wind energy technology", John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [9] S .Winjnbergen, "Wind Force 12. A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020", Global Wind Energy Council (GWEC) report, Jun. 2005.
- [10] www.neal-dz.net.
- [11] S. Petibon, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat université Toulouse, 2009.
- [12] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff, "Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools" PV Horizon, Canada, 2001.
- [13] Energies Renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [14] E. Hau, "Wind-turbines, fundamentals, technologies, application, economics, " Editions Springer, 2000.
- [15] M. Ivan "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance" Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).

-
- [16] " L'Energie Eolienne", Dossier REE No 5, Mai 2005.
- [17] F. Poitiers, " Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne ", thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [18] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, "A Comparison of Electrical Systems for Variable Speed Operation of Wind Turbines ", European Wind Energy Conf., 1994, p. 500-505.
- [19] L. Moreau and al, " AC/DC Stage Control for Synchronous and Asynchronous Three phase Generator in Dispersed Generation", EPE 2003, Toulouse.
- [20] C. Wagner Pereira. " L'énergie éolienne : Principe de fonctionnement, développement viable ". Mai – 2006.
- [21] S. Astier, " Des machines à aimants permanents aux systèmes énergétiques autonomes. Systémique, électricité et développement durable ", Habilitation à diriger des recherches à l'Institut National Polytechnique de Toulouse 2003.
- [22] C. Pertusa, " Contribution à la définition de moteurs à aimants permanents pour un véhicule électrique hybride routier", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse 1996.
- [23] M.K. Jenkins " Potential opportunities for new class of rare-Earth permanent magnets in electrical machines » RGE N°4/9-april1991.
- [24] B. Multon " Application des aimants aux machines électriques", ENS de Cachan, antenne de Bretagne 2002.
- [25] M. Lopez, " Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour une unité de production isolée", Thèse de doctorat université PARIS-SUD11, 2008.
- [26] G. Siguier " L'électronique de puissance" Edition DUNOD 1990.
- [27] S. Meier, "Theoretical design of surface-mounted permanent magnet motors with field weakening capability" Master Thesis Stockholm 2002.
- [28] L. Gasc, "Conception d'un actionneur à aimants permanents à faibles ondulations de couple pour assistance de direction automobile Approches par la structure et par la commande" Thèse de doctorat université Toulouse, 2004.
- [29] A. Abdelli, " Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive" thèse docteur, INP Toulouse, 2007.

- [30] A. Bernardis "Etude et optimisation d'un alternateur à aimants/redresseur commande application à un véhicule hybride" thèse de doctorat L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Dec 2000.
- [31] F. Chabot, "Contribution à la conception d'un entraînement basé sur une machine à aimants permanents sans capteur sur une large plage de vitesse", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000.
- [32] Z.Q.Zhu, D. Howe, E. Bolte " Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet de motors" - Partie VI: Magnetic field on load IEEE vol 29 N° =1, january 1993, pp 152-158.
- [33] P. Ragot, "Modélisation analytique multi physique pour la conception optimale de moteurs synchrones à aimants permanents" thèse de doctorat es science, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008.
- [34] F.Gillon "Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques " thèse de docteur universitaire de LILLE (déc.1997).
- [35] Flux2D (Version 7.6) Tutorial: Brushless permanent magnet motor. CEDRAT, 2001.
- [36] D.C Hanselman "Brushless permanent magnet motors design" Mc Graw-Hill, INC 1994.
- [37] J. Chatelain, "Machines électriques", Tome 1, Dunod, 1983.
- [38] J. Royer, T. Djiako " Le pompage photovoltaïque", Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, Québec CANADA.
- [39] " Energie photovoltaïque " Guide d'énergie renouvelable 2002.
- [40] B. Azoui " Concept and realization of three-phase brushless DC motor (BLDCM) for solair application ", Thesis docteur d'état Es-science, may 2002, university of Batna.
- [41] G. Walker "Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV Model ", Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane, 2000.
- [42] A. Oi. "Design and simulation of photovoltaic water pumping system ", Theses Master of Science in Electrical Engineering, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.

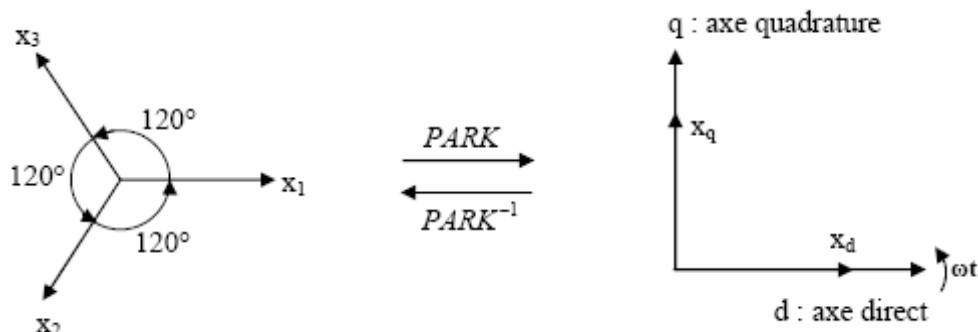
- [43] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.
- [44] M. Angel Cid Pastor "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électriques. Thèse présentée en vue de l'obtention de grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2006.
- [45] C. Cédric, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat université Toulouse, 2008.
- [46] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.
- [47] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'Sullivan, " A new maximum power point tracking system", IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993, PESC'93, pp. 833-838, Jun. 1993.
- [48] M. Veerachary, T. Senjyund and K. Uezato, " Feedforward Maximum Power PointTracking of PV systems using fuzzy controller ", IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, No. 3, pp. 969-981, Jul. 2002.
- [49] J. S. ko, B. J. Jung, K. T. Park, C. H. Choi and D. H. Chung, " Maximum power point tracking control of PV system for DC motors drive with neural network ", Smart Manufacturing Application, IEEE ICSMA 2008, pp. 514-519, Apr. 2008.
- [50] J.H. Lee, H.B. Bo and H. Cho, "Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 603-607, Aug. 2006.
- [51] K. Kassmi¹, M. Hamdaoui¹ et F. Olivié, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique"Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.
- [52] M.Fadel, "Lois de commande pour une alimentation AC/DC à absorption de courant sinusoïdal" 3EI 2000.
- [53] J.P. Ferrieux, F. Forest, "Alimentations à découpage Convertisseurs à résonance. Principes-composants, modélisation" Dunod 3e édition – 2001 – ISBN 2-10-004137-1.
- [54] J.Lachaize, M.Fadel, S.Caux, P.Shott, L.Nicod "Modelling and Control of a fuel cell system for electrical rail transport" EPE 2003 – Toulouse, France – Sept 2-4.

- [55] K. Idjdarene " Contrôle d'une génératrice asynchrone à cage dédiée à la conversion de l'énergie éolienne" JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [56] VJ. Modi, M. Fernando, "Performance of the Savonius Wind Turbine", Journal of solar Engineering, Vol.III, p 71-81, 1989.
- [57] A. Mirecki " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", thèse INP Toulouse, 2005.
- [58] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension" thèse de Doctorat de l'Université Lille, France, 2004.
- [59] R.Cardenas- Dobson "Control of Wind Turbine Using a Switched Reluctance Generator" Thèse Doctorale à l'Université de Nottingham, 1996.
- [60] R. Abdessemed, " Modélisation des machines électriques", Batna university press, 1997.
- [61] F. Meibody-Tabar, "Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension ; modélisation, commande et segmentation de puissance," Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, janvier 2000.
- [62] A.S. Toledo, " Commande directe et observation des convertisseur de puissance application à l'onduleur de tension triphasé" Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'INPG, 2000.
- [63] Les moteurs synchrones et leurs applications industrielles, Journées de l'enseignement et de l'électrotechnique et de l'électronique industrielle, SEE-MAFPEN, Gif-sur-Yvette, mars 1995.
- [64] M. Sc. Mariusz Malinowski "Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifier" in Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical Engineering *Institute of Control and Industrial Electronics*, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2001.
- [65] A. Mirecki, X. Roboam and F.Richardeau, "Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines" IEEE Trans. On industrial electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007.
- [66] A.M. Knigh, G.E. Peters "Simple Wind energy controller for an expanded operating range", IEEE Trans. on energy conversion, 20(2), 459-466, 2005.
- [67] M.W. Naouar, "commande numerique à base de composants FPGA d'une machine synchrone"these de docteur de l'ecole nationale d'ingenieur de TUNIS, 2007.

- [68] Danish Wind Industry Association. <http://www.windpower.org>.
- [69] B.Multon, X. Roboam, B.Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud et H. Ben Ahmed " Aérogénérateurs électriques " Techniques de l'ingénieur, Ref D3960 – Vol D7, 2004.
- [70] G. Sturtzer, E. Smichel "Modélisation et commande des moteurs triphasés" Edition Ellipse 2000.
- [71] M. Dali, J. Belhadj, X Roboam, "Conception et commande de systèmes hybrides photovoltaïque-éolien", Revue internationale de génie électrique RIGE, Vol. 9, No. 6, Décembre 2006, pp 719-752.
- [72] A. Ben Rhoumamm, J. Belhadjmm X. Roboam "Control and energy management of a pumping system fed by hybrid Photovoltaic-Wind sources with hydraulic storage", International conference on Electrical Engineering Design and Technologies ICEET, Hammamet, Tunisia Nov 2007.
- [73] M. Turki, J. Belhadj, X. Roboam, "Design and Energy management of a small-scale reverse osmosis desalination unit powered by PV-Wind hybrid system without battery storage", International conference on Electrical Engineering Design and Technologies (ICEEDT), Nov. 2007, Hammamet, Tunisia.
- [74] P. Schulhof, D. Ballay, " Les stations de pompage d'eau 5e édition", Travaux de la commission de distribution de l'eau de l'AGHTM, Editions TEC& DOC. Paris.
- [75] J.M. Hirtz, "Les stations de pompage d'eau", Ed.Lavoisier, TEC& DOC, 1991.
- [76] C. Pfliegerer and H. Peterman "Stroemungsmoshlein Springer verlag" berlin, heidelberg, New York, 1972.
- [77] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. Sada , « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français.
- [78] H. Gazanaga Arantzamedi, "étude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisée application aux micro réseaux" thèse de docteur INPG 2006.
- [79] J. Woo Jung, " Project # Roject sine- Δ PWM INVERTER" PH.D Student, the OHIO state university.
- [80] S. Belakehal, H. Benalla and A. Bentounsi "Power maximization control of small wind system using permanent magnet synchronous generator "Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 307 – 319.

A. Rappel sur la transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé continu.



A.1 Passage du repère triphasé au repère de Park

Le passage du repère dit dans le repère "dq" d'un système triphasé x_1, x_2, x_3 s'écrit:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Avec:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$[P(\theta)]$: est appelée "matrice de Park" est l'angle θ indique la vitesse de rotation du repère ($\theta = \omega t$).

A.2 Passage du repère de Park au repère triphasé

A l'inverse, pour le retour à un système triphasé on utilise la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$[P(\theta)]^{-1}$: est appelée "matrice de Park inverse"

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Le produit des matrices de Park et Park inverse donne la matrice identité $[I]$:

$$[P(\theta)][P(\theta)]^{-1} = [I] \quad (\text{A.6})$$

B. Formule de Betz

Lorsque l'hélice est aéromotrice, le flux est ralenti au passage du disque rotor

(figure 12) : $V_0 > V_1 > V_2$

- V_0 vitesse axiale initiale du vent
- S_0 surface à l'entrée du tube de courant
- V_1 vitesse du vent dans le plan du rotor
- S_1 surface du rotor
- V_2 vitesse du vent à l'aval du rotor
- S_2 surface à l'aval du rotor

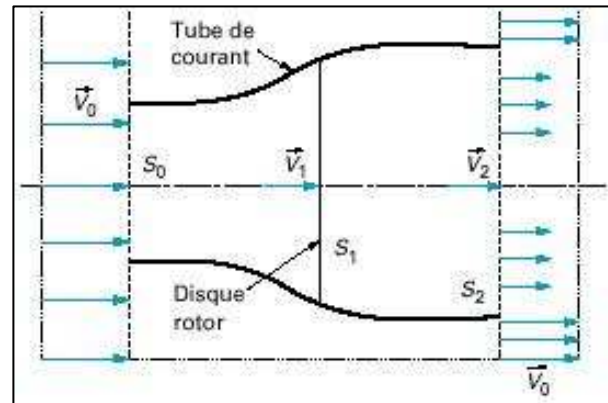


Figure (B.1) : Représentation du tube de courant

En appliquant la théorie de Froude (et les hypothèses associées), on obtient :

- Pour la puissance absorbée par le rotor :

$$P = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (\text{B.1})$$

Avec : ρ (kg.m^{-3}) masse volumique de l'air.

- Pour la variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{B.2})$$

$P = \Delta E_c$ donne :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \text{ est l'expression de la vitesse moyenne.}$$

L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval, $\frac{dP}{dV_2}$, fournit

une seule racine ayant un sens physique : $V_2 = \frac{V_0}{3}$, correspondant au maximum de puissance.

En définissant le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P}{0.5 * \rho S_1 V_0^3} \quad (\text{B.3})$$

On aboutit à la limite de Betz, première personne ayant développé la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal :

$$C_{P_{MAX}} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne.

C. Principaux paramètres des éléments considérés du système

C.1 Paramètres du module photovoltaïque AEGPQ-40	
Courant du court circuit	$I_{SC} = 2.41A$
Tension du circuit ouvert	$V_{OC} = 22.4V$
Courant du point de puissance maximale	$I_m = 2.2A$
Tension du point de puissance maximale	$V_m = 17.45V$
La résistance série / cellule	$R_s = 0.8\Omega$
Le nombre de cellules solaires en série	$N_s = 36$
La puissance crête à crête	38W

C.2 Paramètres de l'éolienne – Turbine Savonius	
Rayon de la voilure	$R=0,5 \text{ m}$
Hauteur de la voilure	$H=2 \text{ m}$
Surface active	$S=2 \text{ m}^2$
Vitesse réduite optimale	$\lambda = 0.78$
Inertie de la voilure	16 kg.m^2
Coefficient de puissance optimal	$C_p = 0.15$
Masse volumique de l'air	1.2 kg.m^{-3}

C.3 Paramètres de la GSAP	
Tension nominale :	$V_n = 90V$
Puissance nominale	$P_n = 600W$
Courant nominale	$I_n = 4.8A$
Nombre de paires de pôles	$2p=4$
Résistance des enroulements :	$R_s = 1.4\Omega$
Inductance synchrone	$L_s = 0.0263H$
Flux efficace	$\Phi_{eff} = 0.15Wb$

C.4 Paramètres du bus continu	
La tension	$220V$
Capacité	$500\mu F$
C.4 Paramètres du filtre LC	
Inductance du filtre	$L_f = 0.9mH$
Résistance du filtre	$C_f = 900\mu F$

C.5 Paramètres de la charge

Résistance de la charge	$R_{ch} = 40\Omega$
Inductance de la charge	$L_{ch} = 16mH$

C.6 Paramètres du Moteur BLDC à aimants permanents

Courant nominal	4.8 A
Tension nominale	220 V
Puissance utile	690 W
Constant du moteur (k_e)	0.6 V/s/rd
Vitesse de rotation	3000 tr/min
Résistance de phase (R)	1.4 Ω
L'inductance de phase (L)	5 mH

C.7 Paramètres de la pompe centrifuge

La vitesse nominale	2840 tr/min
Constant de la pompe	$2.26 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}/(\text{rad/s})$
Hauteur manométrique	11 m
Hauteur statique	7.4 m
Diamètre	50 mm
Densité de l'eau	$1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$

C.8 Paramètre de l'onduleur de tension

Fréquence de commutation	$f_c = 10 \text{ KHz}$
Fréquence de référence	$f = 50 \text{ Hz}$
Rapport de modulation	$m = 0.8$

D. Commande du système éolien avec un pont de diodes

Le système étudié est présenté à la figure D.1. Il est composé d'une turbine éolienne à axe verticale, d'une machine synchrone à aimants permanents, d'un pont à diodes qui fait la conversion électrique AC/DC et d'un hacheur DC/DC survolteur, un système de commande et la charge.

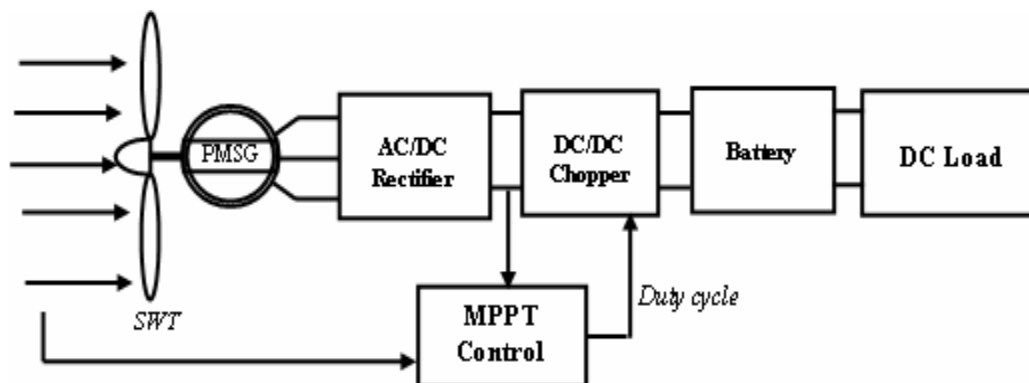


Figure (D.1) : Schéma du générateur éolien à pont de diodes

D.1 La machine synchrone à aimants permanents

Le générateur est une machine synchrone à aimants permanents qui est modélisée simplement par une source de tension avec une impédance en série. Le circuit équivalent et le diagramme de Behn-Eschenburg sont montrés à la figure D.2.

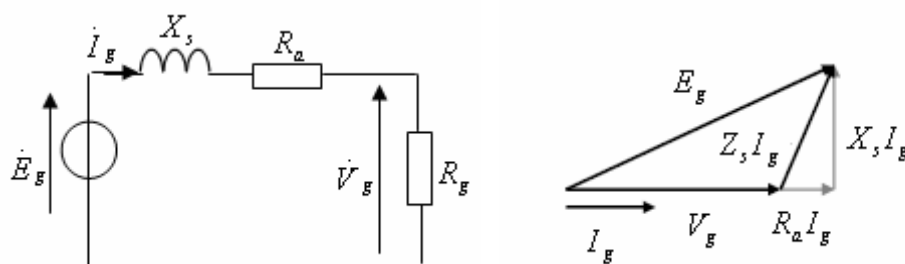


Figure (D.2) : Schéma équivalent du générateur synchrone et diagramme de Behn-Eschenburg associé

Une fois connues les tensions E_g et V_g , il reste à connaître la valeur du courant de ligne. Pour cela, le diagramme de Behn-Eschenburg du modèle simplifié de la machine (figure D.2) permet d'obtenir l'équation suivante:

$$\dot{V}_g = \dot{E}_g - jX_s \dot{I}_g - R_a \dot{I}_g \quad (D.1)$$

Où : E_g f.e.m à vide, R_a résistance de l'enroulement et X_s réactance synchrone.

De l'équation (D.1) nous déduisons le courant de ligne:

$$I_g = \frac{E_g}{(R_g + R_a) + jX_s} \quad (D.2)$$

L'amplitude du courant de ligne est exprimée comme :

$$|I_g| = \frac{|E_g|}{\sqrt{(R_a + R_g)^2 + X_s^2}} \quad (D.3)$$

La valeur de la puissance P_g par la machine peut alors s'exprimer en fonction des valeurs efficaces ou des valeurs maximales :

$$P = 3|I_g||V_g| \cos \varphi = 3R_g |I_g|^2$$

$$P = 3R_g \frac{E_g^2}{(R_g + R_a)^2 + X_s^2} \quad (D.4)$$

D.2 Redresseur triphasé à diodes

Nous proposons une modélisation au premier harmonique de ce dispositif. Nous faisons l'hypothèse d'un fonctionnement équilibré du dispositif. La relation entre les tensions des cotés AC et DC du circuit électrique de puissance peut se mettre sous la forme :

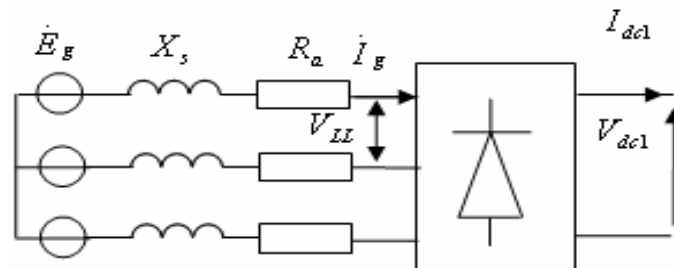


Figure (D.3) : Schéma de l'association MSAP- pont de diode

$$V_{dc1} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} V_{LL} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$$

$$V_{dc1} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_g \quad (D.5)$$

Ou : V_g est la valeur crête de la tension fondamentale phase-neutre à l'entrée du redresseur (aux bornes de la machine) et V_{dc1} la tension batterie.

Pour connaître maintenant le courant continu I_{dc1} , on sait que le redresseur à diodes a

des courants pratiquement en phase avec les tensions d'entrée (facteur de déplacement ($\cos(\varphi)$) quasiment unitaire). Donc, à partir d'une relation énergétique et en négligeant les pertes dans les diodes, on peut obtenir une expression de la valeur du courant de charge de la batterie en fonction de la valeur crête du courant de la machine avec I_g :

$$I_{dc1} V_{dc1} = 3V_g I_g \quad (D.6)$$

On en déduit :

$$I_{dc1} = \frac{3V_g I_g}{V_{dc1}} \quad (D.7)$$

En remplace V_g sa valeur en obtient:

$$I_{dc1} = \frac{3\pi V_{dc1}}{3\sqrt{6}V_{dc1}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_g \quad (D.8)$$

Doc la relation de la tension V_{dc1} et donnée par:

$$V_{dc1} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} R_g I_g \quad (D.9)$$

En divisant les deux membres de (D.7) par (D.5), nous aurons:

$$R_{dc1} = \frac{V_{dc1}}{I_{dc1}} = \frac{18}{\pi^2} R_g \quad (D.10)$$

Le convertisseur survolteur est représenté par les schémas suivants :

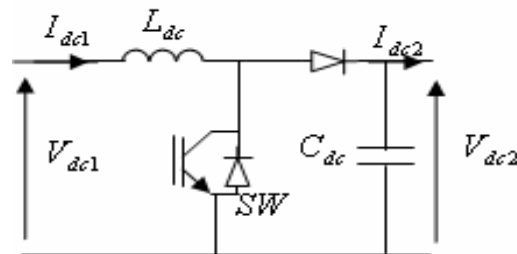


Figure (D.4) : schéma du convertisseur DC/DC

L'équation de la tension de sortie du convertisseur est:

$$V_{dc2} = \frac{1}{1-D} V_{dc1} \quad (D.11)$$

Où D représente le rapport cyclique :

Si on se place côté source de tension DC, il est possible de considérer le circuit hacheur et la résistance de charge R_l comme étant équivalents à une résistance variable fonction du rapport cyclique. Cette résistance variable R_{dc1} est définie par :

$$I_{dc1} = \frac{V_{dc1}}{R_{dc1}} \quad (\text{D.12})$$

Le courant de sortie I_{dc2} est fonction de la tension de sortie V_{dc2} et de la résistance de charge R_l selon l'expression :

$$I_{dc2} = \frac{V_{dc2}}{R_l} \quad (\text{D.13})$$

Les équations suivantes sont obtenues sachant que les puissances d'entrée et de sortie du hacheur sont égales :

$$V_{dc1} I_{dc1} = V_{dc2} I_{dc2} \quad (\text{D.14})$$

En substituant l'équation (D.11) dans (D.14), V_{dc1} et V_{dc2} s'éliminent pour donner :

$$I_{dc2} = (1 - D) I_{dc1} \quad (\text{D.15})$$

En divisant les deux membres de (D.10) par (D.14), nous aurons :

$$\frac{V_{dc2}}{I_{dc2}} = \left(\frac{1}{1 - D} \right)^2 \frac{V_{dc1}}{I_{dc1}} \quad (\text{D.16})$$

Enfin, en substituant (D.12) et (D.13) dans (D.16), nous obtenons :

$$R_{dc1} = (1 - D)^2 R_l \quad (\text{D.17})$$

De l'équation (D.17), il se confirme bien que la résistance, vu côté source de tension DC, le hacheur survolteur peut s'exprimer en fonction du rapport cyclique D .

Enfin, en substituant (D.10) dans (D.17), nous obtenons :

$$R_g = \frac{\pi^2}{18} R_{dc1} = \frac{\pi^2}{18} (1 - D)^2 R_L \quad (\text{D.18})$$

D.3 Stratégie de Commande Proposée

Dans le cas où le système fonctionne au point de puissance maximale on recherche la relation entre la puissance du générateur et la le rapport cyclique du convertisseur DC/DC à vitesse de rotation constante.

La puissance électrique P du générateur et donnée par la relation:

$$P = 3R_g \frac{E_g^2}{(R_g + R_a)^2 + X_s^2} \quad (\text{D.19})$$

En remplace les deux membres de (D.10) par (D.19), nous aurons :

$$P_g = \frac{\pi^2}{6}(1-D)R_L \frac{(K\Phi\Omega)^2}{\left\{ \frac{\pi^2}{18}(1-D)^2 R_L + R_a \right\}^2 + X_s^2} \quad (\text{D.20})$$

La tension du sortie de pont de diode, a partir de l'équation est devient:

$$V_{dc1} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}(1-D)^2 R_L \frac{K\Phi\Omega}{\sqrt{\left(\frac{\pi^2}{18}(1-D)^2 R_L + R_a \right)^2 + X_s^2}} \quad (\text{D.21})$$

La tension de la sortie du hacheur :

$$V_{dc2} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}(1-D)R_L \frac{K\Phi\Omega}{\sqrt{\left(\frac{\pi^2}{18}(1-D)^2 R_L + R_a \right)^2 + X_s^2}} \quad (\text{D.22})$$

Ceci est donc équivalent à la recherche de la condition réalisant l'annulation de la dérivée de la fonction $P(D)$:

$$\frac{dP_g}{dD} = 0 \quad (\text{D.23})$$

$$\text{Si en pose } x = \frac{\pi^2}{18}(1-D)^2 R_L$$

$$\frac{dx}{dD} = -\frac{\pi^2}{9}(1-D)^2 R_L \quad (\text{D.24})$$

La puissance du générateur en fonction de x est donnée par:

$$P_g = \frac{3(K\Phi\Omega)^2 x}{(x + R_a)^2 + X_s^2} \quad (\text{D.25})$$

Le calcul de la dérivée de la puissance donne :

$$\frac{dP_g}{dD} = \frac{dP_g}{dx} * \frac{dx}{dD} \quad (\text{D.26})$$

$$\frac{dP_g}{dD} = \frac{\pi^2 (K\Phi\Omega)^2 R_L (1-D)}{3} * \frac{\left(\frac{\pi^2}{18}(1-D)^2 R_L \right)^2 - (R_a^2 + X_s^2)}{\left(\left(\frac{\pi^2}{18}(1-D)^2 R_L + R_a \right)^2 + X_s^2 \right)^2} \quad (\text{D.27})$$

Et la résolution pour l'annulation de la dérivée de la fonction:

$$\frac{dP_g}{dD} = 0 \quad (\text{D.28})$$

Donne la valeur de la D en fonction des paramètres du générateur pour que la puissance électrique possible à extraire soit maximale :

$$D_m = \frac{\pi\sqrt{R_L}}{\pi\sqrt{R_L} + 3\sqrt{2\sqrt{R_a^2 + X_s^2}}} \quad (\text{D.29})$$

Enfin, en substituant (D.18) dans (D.21) et (D.22) nous obtenons les équation de la tension de la sortie du redresseur et la tension à la sortie du convertisseur :

$$V_{dc1} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{K\Phi\Omega\sqrt{R_a^2 + X_s^2}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2} + R_a\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \quad (\text{D.30})$$

$$V_{dc2} = \sqrt{\frac{3R_L}{2\sqrt{R_a^2 + X_s^2}}} * \frac{K\Phi\Omega\sqrt{R_a^2 + X_s^2}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2} + R_a\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \quad (\text{D.31})$$

La figure (D.5) la courbe de puissance maximale électrique est au dessus du tracé de la puissance optimale pour tout point de fonctionnement.

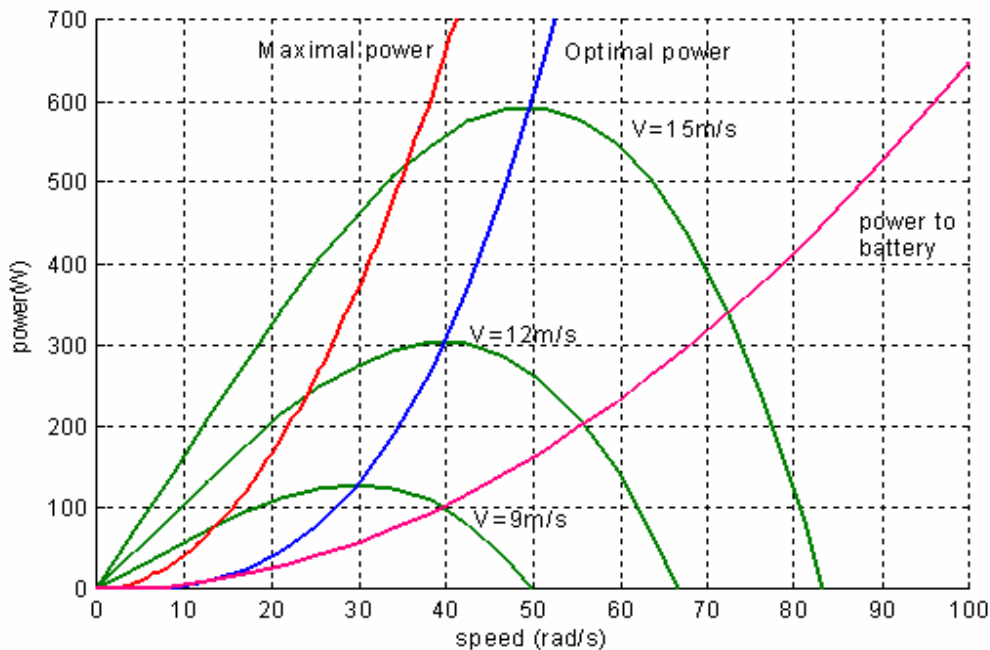


Figure (D.5) : Plan $P = f(\Omega)$

Les figures (D.7 à D.9) représentent respectivement les résultats de simulation de la puissance, couple et les tensions avec application de la loi de commande à vitesse de vent sont présentées dans la figure (D.6).

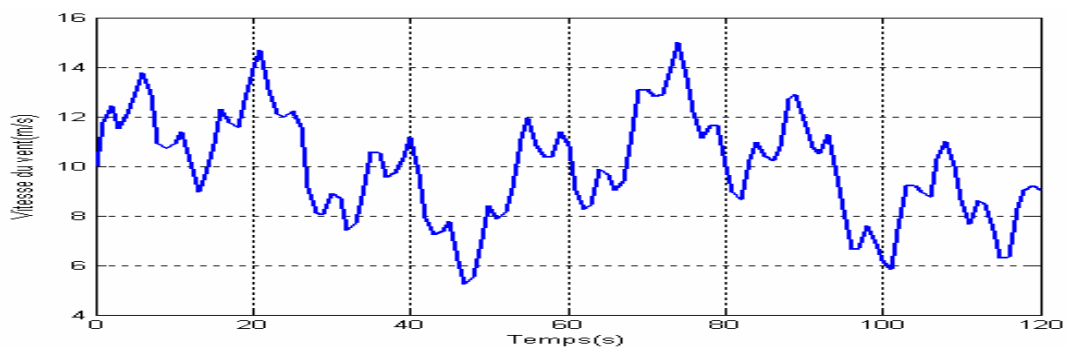


figure (D.6) : Courbe de la vitesse du vent

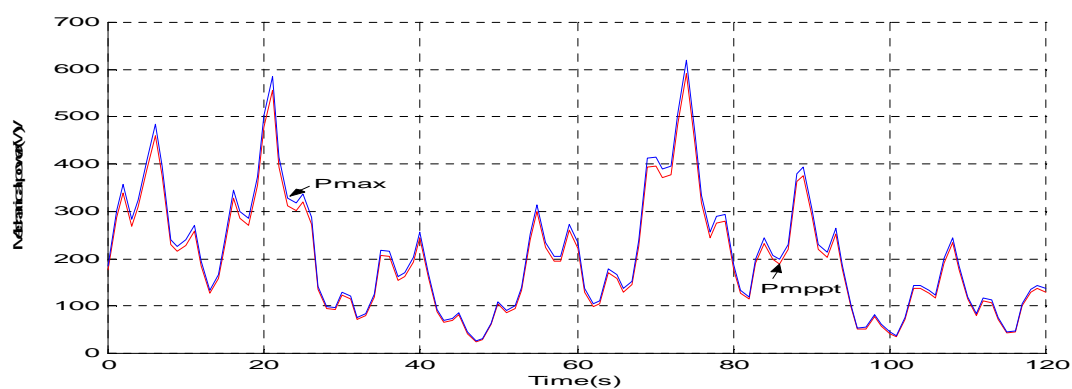


Figure (D.7) : Courbe des puissances

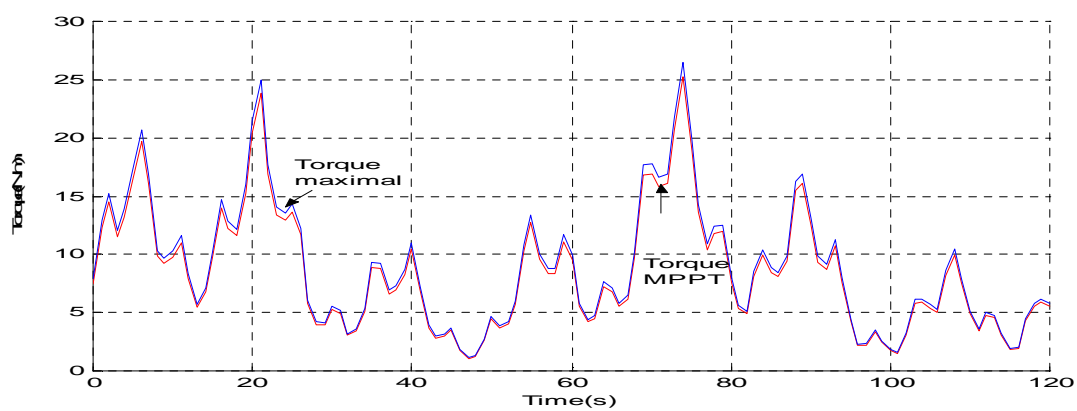


Figure (D.8) : Courbe des couples

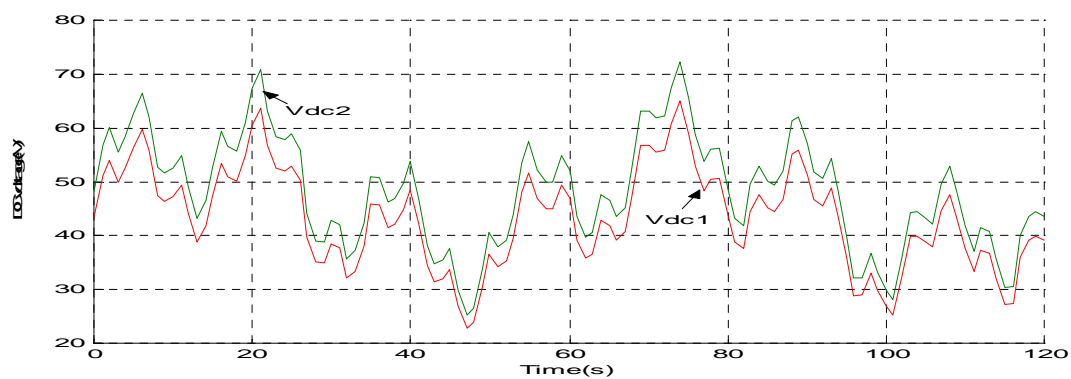


Figure (D.9) : Courbe des tensions

Lexique

<i>APP</i>	Avec Pièces Polaires
<i>BLDCM</i>	Brushless Direct Current Motor
<i>AC</i>	Alternative Current (courant alternatif)
<i>DC</i>	Direct Current (courant continu)
<i>EnR</i>	Energies Renouvelables
<i>GSAP</i>	Génératrice Synchrone à Aimants Permanents
<i>GWEC</i>	Global Wind Energy Council
<i>GPV</i>	Générateur PhotoVoltaïque
<i>MADA</i>	Machine Asynchrone Double Alimentation
<i>MSAP</i>	Machine Synchrone à Aimants Permanents
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<i>MAS</i>	Machine Asynchrone
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking
<i>MS</i>	Machine Synchrone
<i>SPP</i>	Sans Pièces Polaires
<i>WT</i>	Wind Turbine (Turbine Eolienne)

Résumé

Le système énergétique étudié dans cette thèse est de type hybride à deux sources d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) couplées à des convertisseurs d'adaptation et de conversion des formes d'énergie électrique avec une application au site isolée en utilisant les machines à aimants permanents (*MSAP*). En effet, ces machines présentent beaucoup d'avantages par rapport aux machines conventionnelles à enroulements, notamment un rendement amélioré par l'élimination des pertes joules (enroulements remplacés par des aimants permanents) et une maintenance très réduite.

L'étude a débuté par une procédure de conception assistée par ordinateur utilisant les formules analytiques simples. Ensuite, une modélisation plus fine mais également plus globale est réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis.

Les modèles des chaînes de production éolienne (machine à aimants et redresseur commandé) et photovoltaïque (modules *PV* et hacheurs à commande *MPPT*) sont établis pour gérer la production d'énergie à partir des données des vitesses du vent et de l'éclairement solaire. Les modèles de simulation ont été utilisés pour étudier et réguler les flux d'énergies entre les deux sources (solaire et éolienne), ainsi que les différentes stratégies de commande appliquées pour transférer une puissance maximale à la charge.

Mots clés : *énergies renouvelables, photovoltaïques, éoliennes, commande MPPT, machine à aimants permanents, redresseur, élément finis, pompage d'eau, onduleur MLI.*