

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

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

Faculté des Sciences de L'ingénieur
Département d'Electrotechnique

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère
en Electrotechnique

Option : MODELISATION ET COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES

Par :

REDJEM Radia

Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

Soutenu le : 04 /07/2009

Devant le jury :

Président : **BENALLA HOCINE**

Prof. Université de Constantine

Rapporteur : **BOUZID AISSA**

Prof. Université de Constantine

Examineurs : **BOUCHERMA MOHAMED**

M.C. Université de Constantine

CHENI RACHID

M.C. Université de Constantine

Remerciements

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

Je remercie ensuite ma chère mère Yamina, ma belle mère Rachida, mon père, mon beau père, mes frères, mes belles sœurs. Et surtout ma fille Karima Oudjden et mes nièces Mariam Loudjaine et Minate Allah.

Je remercie également mon encadreur, le professeur Bouzid Aissa, ainsi que les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail, à savoir le professeur H. Benalla, président du jury, Les docteurs M. Boucherma et R. Cheni (maîtres de conférences habilités) qui n'ont pas hésité à accepter d'être membres de jury.

Je terminerai par remercier toutes mes amies, notamment Dalila, Fairouz, Ilhem, Sihem, Fairouz, Wassila, et Rima, ainsi que tous les enseignants du département d'électrotechnique.

Dédicace

A ma fille Karima Oudjdane

A mon mari Hichem.

INTRODUCTION GENERALE

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables avec l'adoption de l'éolien.

Les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

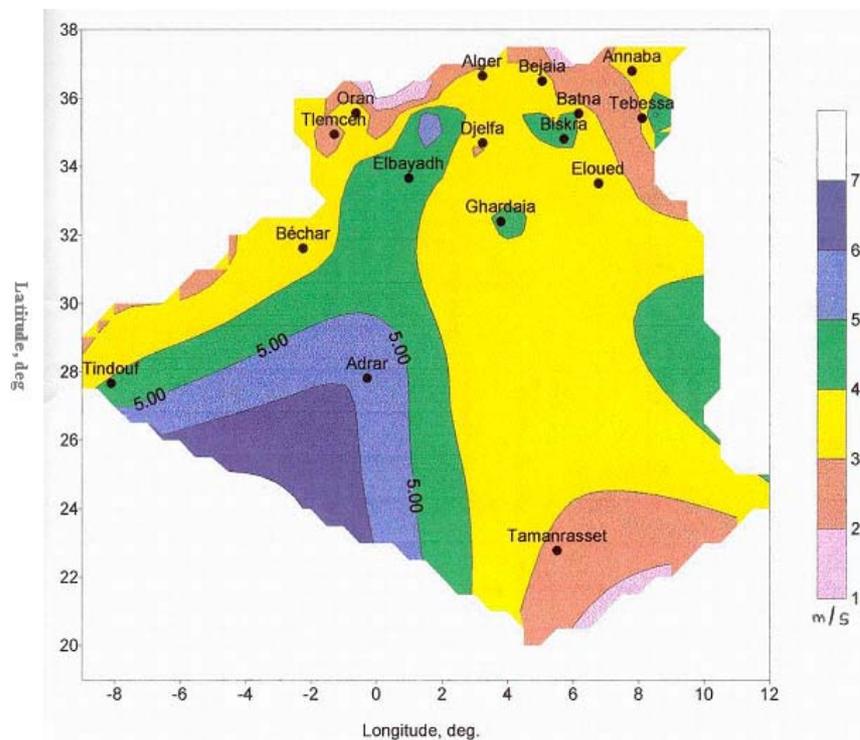
Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Les types de modèles utilisés dans le domaine des énergies nombreux, parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : les énergie renouvelables sont d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...). Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent. En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908.

En raison de la nature fluctuante du vent, l'éolien ne peut être considéré que comme une source d'énergie de complément et non de remplacement des solutions classiques. Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne .L'Allemagne est aujourd'hui le premier producteur mondial avec une production de 14.6 GW en 2003 , l'Espagne est au deuxième rang avec 6.4 GW, les USA au troisième rang avec 6.3 GW et le Danemark au quatrième rang avec 3.1 GW . La France est au dixième rang européen avec 0.253 GW. L'Union Européenne avec 4,15 GW.

En Algérie, on a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, voir carte des vents). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.



Carte préliminaire des vents de l'Algérie.

Pour le site de Tamanrasset, le potentiel éolien étant très faible alors que le potentiel solaire semble plus satisfaisant. Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuse avec dans notre pays.

- Une généralité sur les systèmes éoliens est présentée dans le premier chapitre.
- Le second chapitre comporte la modélisation des éléments de la chaîne de conversion.

- Dans le troisième chapitre nous donnons les résultats de simulation en utilisant une génératrice synchrone.
- Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction -----	4
I.2 Les principales sources d'énergies renouvelables -----	4
I.2.1 Génération de la chaleur -----	4
I.2.2 Génération d'électricité-----	8
I.3 Principes et éléments constitutifs de l'éolien -----	12
I.3.1 Définition de l'énergie éolienne -----	12
I.3.2 Descriptif d'une éolienne -----	12
I.3.3 Principaux composants d'une éolienne-----	14
I.3.4 Le principe de fonctionnement d'une éolienne-----	17
I.4 Les différents types d'éoliennes-----	18
I.4.1 Eoliennes à axe vertical -----	20
I.4.2 Eoliennes à axe horizontal -----	21
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne -----	22
I.5.1 Les avantages-----	22
I.5.2 Les inconvénients-----	23
I.6 Conclusion-----	25

I.1 INTRODUCTION

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

I.2 LES PRINCIPALES SOURCES D'ÉNERGIES RENEUVELABLES

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..).

I.2.1 GENERATION DE LA CHALEUR

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole [3].

Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables:

- **Thermo solaire**

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage [29].

Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [3].

Cette énergie représente un rendement élevé et permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement. La marge de manœuvre, en matière de substitution aux énergies fossiles, est très importante : s'il est certes impossible de se chauffer uniquement par le soleil (la chaleur ne se stocke pas sur de longues périodes), il serait toutefois possible de produire 50% de l'énergie de chauffage dont nous avons besoin [29].

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type de capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines). Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement.

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent. En 2003 environ 14000 m² de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22% [3].

- **Géothermie**

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. A part cela il existe également la géothermie volcanique.

En général, l'énergie géothermique est exploitée en pompant en utilisant des puits de forage de l'eau chaude provenant d'une zone du sous-sol poreuse imprégnée d'eau très chaude. La chaleur produite sert dans la plupart des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments. Au cas de températures au-dessus de 150°C la production d'électricité est possible, la puissance installée était de 8 GW électriques en 1998 pour le monde entier [5].

La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étage de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol soit poreux ou perméables et contiennent des aquifères.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement [3]:

- la haute (>180°C).
- moyenne (>100°C).
- basse (>30°C).
- très basse énergie (<30°C).

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques et elle représente comme une source d'énergie constante de forte puissance. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Elle s'apparente davantage à une ressource minière, par la réalisation de ses forages profonds, par les lourds investissements qui la caractérisent et par son exploitation qui consiste à extraire les calories du noyau terrestre et par le fait qu'elle est épuisable. Et par contre la géothermie est limitée au nombre de site.

- **Biomasse**

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois-énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage.

L'énergie peut être stockée et émet peu de gaz à effet de serre. Cependant, la biomasse ne peut avoir qu'un apport limité, en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement.

L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir [3].

- **Thermique**

La centrale thermique produit l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant un combustible tel que charbon, gaz ou fuel. Son cycle de fonctionnement comporte trois phases :

- La transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie de la vapeur dans la chaudière.
- La transformation de l'énergie de la vapeur en énergie mécanique dans la turbine.
- La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans l'alternateur.

Suivant la forme de l'énergie produite, les centrales thermiques sont classées en 2 catégories :

Centrales à turbines à vapeur à condensations et les centrales à turbines à prélèvement dites aussi à turbines contre pression qui sont destinées à la production simultanée d'énergie thermique et d'énergie électrique (chauffage urbain, alimentation en eau chaude).

Ces dernières sont construites au voisinage de grandes villes et sont plus économiques que les centrales à condensation [30].

I.2.2 GENERATION D'ELECTRICITE

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

Selon l'article de [5], la production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ en 1998.

Le plus fort taux de croissance actuel (Environ 30% par an en moyenne depuis plus de 10 ans). A la fin de 2002, La génération d'électricité éolienne est environ de 30,5 GW mondiaux (1% de la puissance totale), 22 GW en Europe et 12 GW en Amérique Nord.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une production d'électricité éolienne de 140 GW mondiaux et 90 GW en Europe [14].

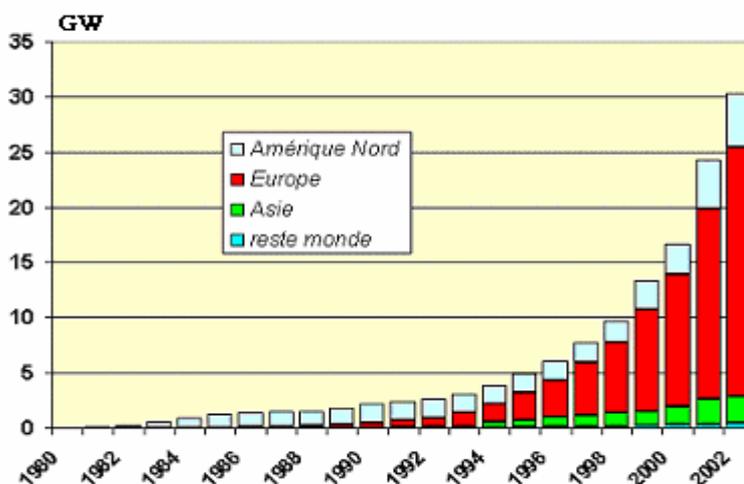


Figure I-1 : La génération d'électricité éolienne

- **Hydraulique**

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment [29]. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable» [3].

Son principal avantage est de fournir de fortes puissances et de stocker l'énergie dans les retenues d'eau.

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique.

En Europe, en 1999, on comptait environ 10 GW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13 GW [9].

- **Énergie de la mer**

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [3].

- **Photovoltaïque**

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standard fournissent une puissance moyenne de 100 W par m² (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que

pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production. [29].

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible [30].

Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [3].

- **Production 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. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur): Ces systèmes demandent une bonne technicité. Si l'on excepte l'Inde et la Chine, peu de pays en développement en fabriquent. Les projets exigent des sites ventés et des niveaux d'investissement élevés. Les puissances obtenues demeurent encore à l'heure actuelle des projets pilotes, sauf au Maroc ou en Mauritanie, car ces applications sont variables selon la vitesse du vent et la taille des pales.

Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 KW. C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum [29].

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. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70 GW.

Parmi les avantages de la production éolienne, le Coût de fonctionnement est relativement faible [3].

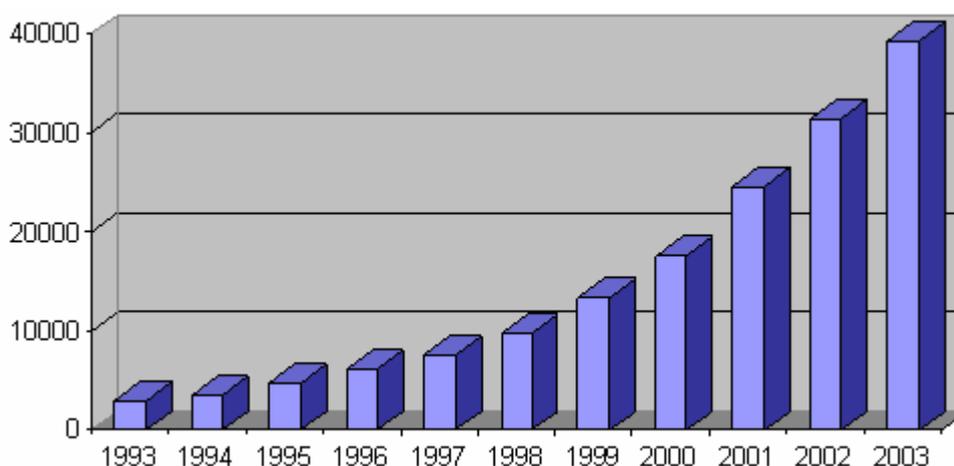


Figure I-2 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.

I.3 PRINCIPES ET ELEMENTS CONSTITUTIFS DE L'EOLIEN

I.3.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE

L'humanité utilise le vent de puis la nuit des temps (bateau à voile, moulin à vents...). C'est certainement la forme d'énergie renouvelable qui connaît le plus fort développement les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (plus 55% en productivité, moins 50% en niveau de bruit) [19].

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique [24].

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyennes fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes [39].

Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin ! En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année. Il convient alors de diviser par 5 la puissance installée pour obtenir la puissance réelle moyenne [39].

I.3.2 DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique [37].

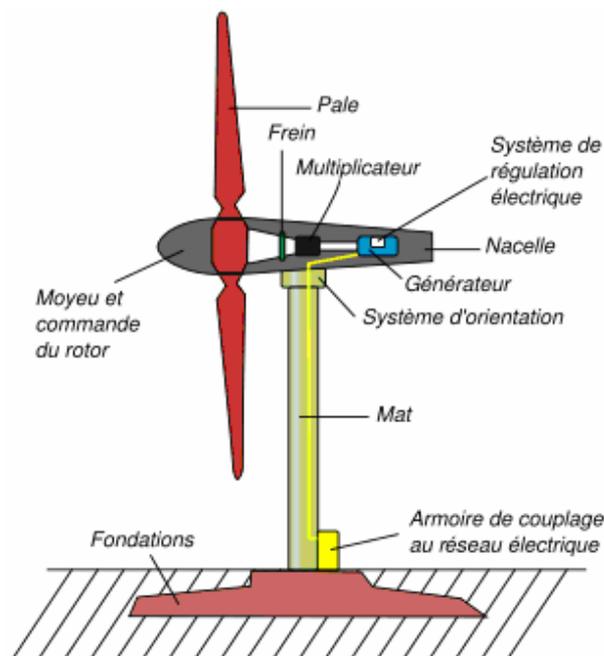


Figure I-3 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

S'agissant du mât, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des fondations... Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur...

Pour qu'une éolienne produise... Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins,

Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps.

Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée.

Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques.

Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [36].

I.3.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

- **le mât**, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). les éoliennes sont-elles si haut perchées C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons...Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [22].



Figure I- 4 : Tour d'une turbine.

nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

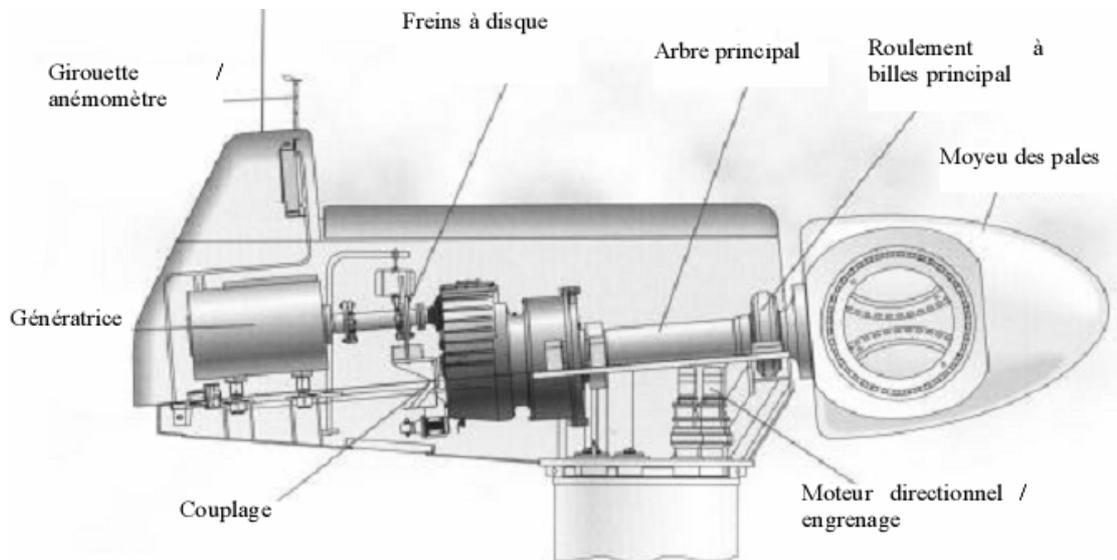


Figure I-6 : Constitution d'une nacelle

Les différents composants d'une nacelle [37] :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

- dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [37].

I.3.4 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible

(inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [36].

I.4 LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-2 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I-2 : classification des turbines éoliennes [23].

Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.
2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.
2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.
3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW) [39].



Figure I-7 : Différents types d'éoliennes.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.4.1 EOLIENNES A AXE VERTICAL

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [11].

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Selon [37] Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

I.4.2 EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [11].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW.

Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [16].

Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples

d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain, des exemples de réalisations pratiques et industrielles de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type Savonius qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse donnant des indices sur les différents perfectionnements du rendement possibles.

I.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.5.1 LES AVANTAGES

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [40], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [19].
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc. ... [37].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [33].
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [37].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [5].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [16].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de

la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [16].

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [Site 1].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [Site 1].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [20].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [34], selon l'article [35] le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [20].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [16].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [Site 1].

I.5.2 LES INCONVENIENTS

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ca reste néanmoins un thème subjectif [16]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [37].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [16], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une

gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [37].

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [Site 1].
- La source d'énergie éolienne étant stochastique [34], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [Site 2].

Selon l'article de [5], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.6 CONCLUSION

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.

CHAPITRE 2 : Etude et modélisation d'une chaîne de production d'énergie éolienne

II.1 Introduction -----	26
II.2 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique -----	26
II.2.1 Loi de Betz-----	26
II.2.2 Le multiplicateur -----	29
II.2.3 Equation dynamique de l'arbre -----	30
II.3 Type de machine électrique -----	31
II.3.1 Générateur synchrone -----	31
II.3.1.1 Machine synchrone à aimants permanents -----	34
II.3.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné -----	38
II.3.2 Générateur asynchrone-----	38
II.4 Modélisation de la machine synchrone a aimants permanents -----	39
II.4.1 Les hypothèses simplificatrices -----	40
II.4.2 Modèle en abc -----	40
II.4.3 Modèle biphasé (transformation de park.) -----	41
II.4.4 Expression du couple électromagnétique-----	43
II.4.5 L'équation mécanique -----	44
II.5 Modèle de l'onduleur de tension -----	44
II.6 Modèle du redresseur -----	46
II.7 La commande M.L.I -----	49
II.8 Conclusion -----	50

II.1 INTRODUCTION

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

A fin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

II.2 ENERGIE CINETIQUE DU VENT – CONVERSION EN ENERGIE MECANIQUE

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique [38].

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [40].

II.2.1 LOI DE BETZ

Etudions l'éolienne présentée (figure II.1). D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{II-1})$$

Avec $S_{éolienne}$ la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air ($1.25 \text{ kg} / \text{ m}^3$) et v la vitesse du vent [8].

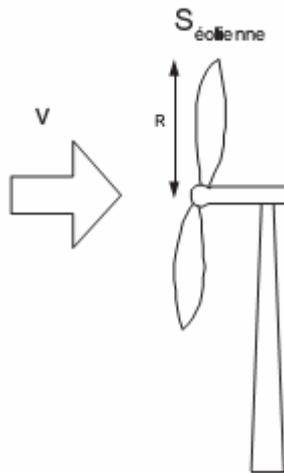


Figure II-1 : Eolienne simplifiée

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p P_{vent} \quad (\text{II-2})$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27.

Le coefficient C_p , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (\text{II-3})$$

Avec R le rayon des pales de l'éolienne, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne et v la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques.

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

$$C_p(\lambda, \beta_i) = (0.44 - 0.0167\beta_i) \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\beta_i}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta_i \quad (\text{II-4})$$

Avec β_i exprimé en degrés.

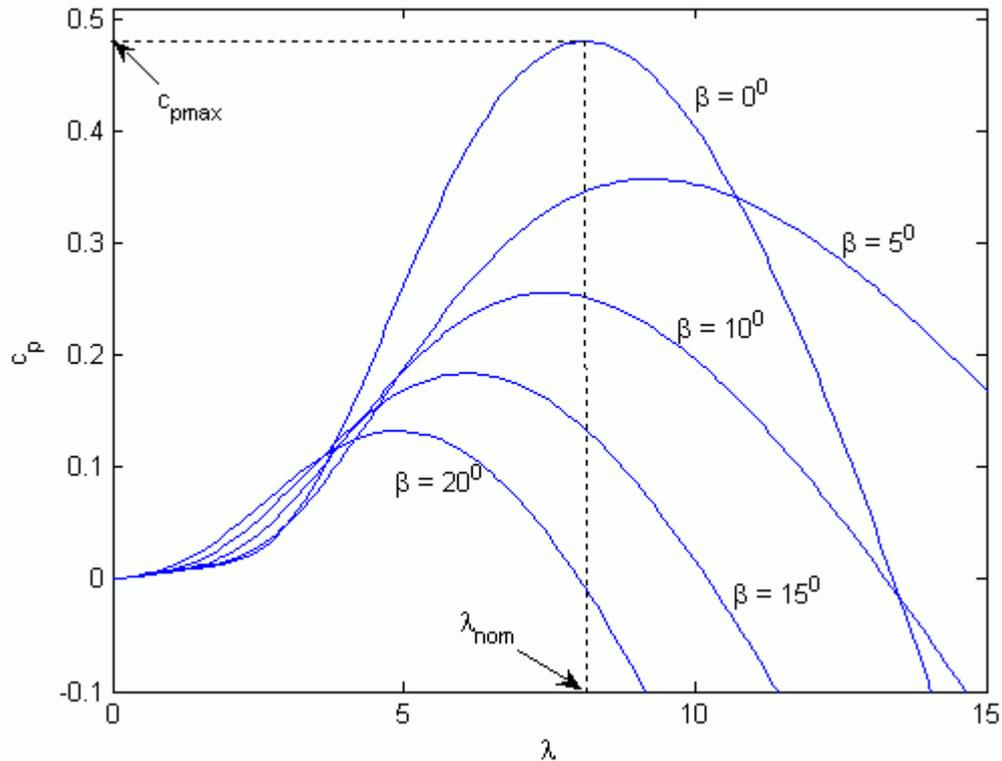


Figure II-2 : Coefficient de puissance C_p

La figure II-2 représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation $C_p(\lambda, \beta_i)$) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à $\lambda_{optimal}$ à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure II.2 montre le $\lambda_{optimal}$ correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_{i3} . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent (équation II.3).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne

un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [23].

Au vu de la caractéristique suivante (Figure II-3), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

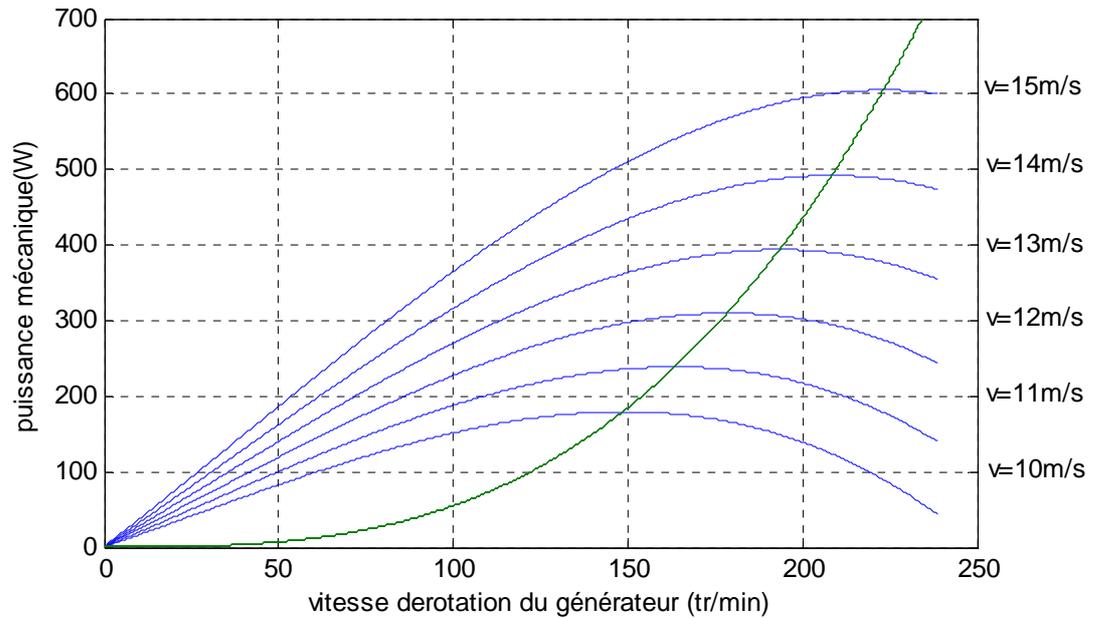


Figure II-3 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

II.2.2 LE MULTIPLICATEUR

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (II-4). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

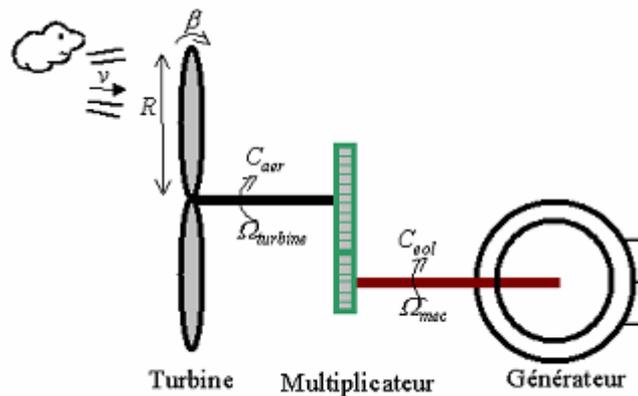


Figure II-4 : Schéma de la turbine éolienne [37].

Avec :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II-5)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II-6)$$

II.2.3 EQUATION DYNAMIQUE DE L'ARBRE

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II-7)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II-8)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II-9)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f [38]:

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II-10)$$

II.3 TYPE DE MACHINE ELECTRIQUE

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [34] :

Fonctionnement à vitesse fixe :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande habilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

Fonctionnement à vitesse variable :

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [34]. On s'intéresse dans ce chapitre par la machine synchrone à aimant permanent.

II.3.1 GENERATEUR SYNCHRONE

L'ensemble des génératrices (ou moteurs) triphasées utilisent un champs magnétique tournant. Si l'on dit que le moteur est synchrone, c'est parce que l'aimant au centre tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique [14], [39].

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau (figure II-5). Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé. Dans ce type de générateur, la rotation de l'aimant, entraîné par le rotor de l'éolienne, doit être synchrone avec l'excitation des bobines, d'où son appellation [38].

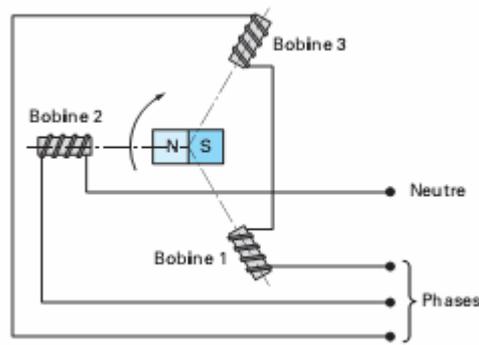


Figure II-5 : Principe du générateur synchrone

En faisant varier le nombre de pôles magnétiques du rotor d'un générateur synchrone, on fait également varier sa vitesse de synchronisation selon la formule suivante pour un réseau fonctionnant sous 50 Hz :

$$\text{Vitesse (tr/min)} = 6\,000 / \text{nombre de pôles.} \quad (\text{II-11})$$

Le nombre de pôles du générateur influe directement sur sa taille, et il faut mentionner que le couple moteur supportable par un générateur dépend de son volume. Habituellement, les générateurs à quatre ou six pôles ont la préférence des constructeurs car leur encombrement permet des économies au niveau de la taille de la nacelle qui doit les accueillir [39].

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 KW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau [34]. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [4], [7].

Dans cette configuration la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur- élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance [34].

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [12].

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 [29].

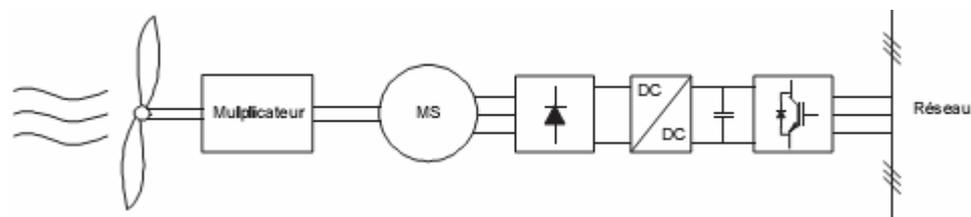


Figure II-6 : Machine synchrone liée au réseau par un ensemble redresseur à diode, convertisseur DC/DC et onduleur MLI

Un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC, peut être utilisé (figure II-6). 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 II-7).

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 [23].

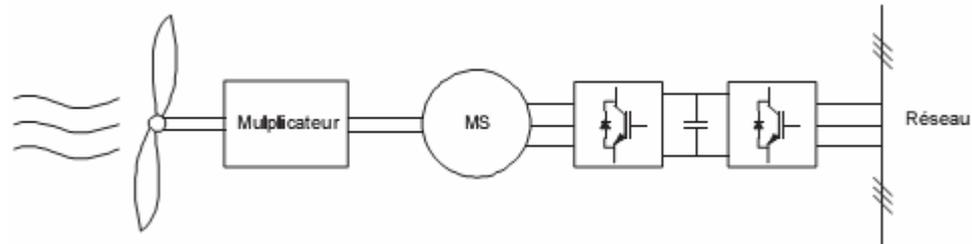


Figure II-7: Machine synchronique avec deux convertisseurs MLI en cascade

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts [31].

La machine synchronique (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la machine synchronique à aimants permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS [32].

Les machines synchrones MS peuvent être à excitation bobinée, généralement avec systèmes sans bagues ni balais [43], [44] ou à excitation par aimants (gain de masse mais surcoût important dû au prix élevé des aimants). Pour les deux types d'excitation, les chaînes de conversion peuvent être les mêmes.

II.3.1.1 Machine synchronique à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation [32].

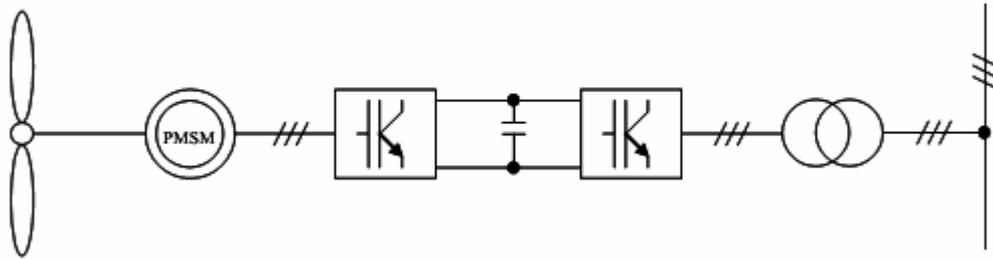


Figure II-8 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

Les principales raisons pour choisir ce type de machine sont: rendement très élevé, grande puissance massique, simplicité du contrôle.

Dans la pratique, des génératrices synchrones à aimants permanents sont très peu utilisées. Il y a plusieurs raisons pour cela : d'abord, les aimants permanents tendent à se démagnétiser lorsqu'ils travaillent dans les champs magnétiques puissants à l'intérieur de la génératrice. En plus, les aimants forts (fabriqués de métaux rares tels que le néodyme) coûtent assez chers, malgré la baisse des prix qui a eu lieu dernièrement [12]. En effet, son rotor est plus léger, permet la régulation de la tension, et son bobinage est facilement modifiable [44].

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [32].

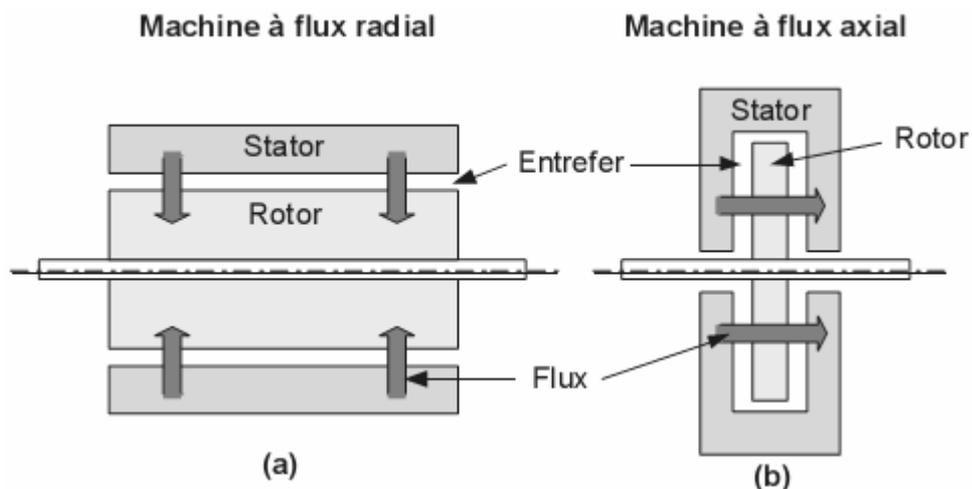


Figure II-9 : Machines à flux radial (a) et axial (b)

- **Machines synchrones à flux axial**

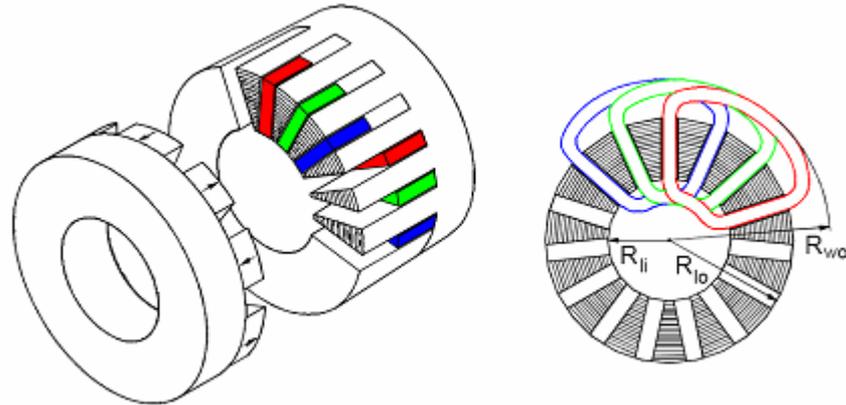


Figure II-10 : Machine synchrone à flux axial.

Pour une machine axialement courte, le volume d'entrefer et donc le couple produit sont plus importants pour une machine à flux axial que pour une machine à flux radial (équation (II-12)).

$$\begin{cases} \Gamma_{radial} \propto R_{ext} L_m \\ \Gamma_{radial} \propto \frac{R_{ext}^2 - R_{int}^2}{2} \end{cases} \quad (II-12)$$

Avec L_m la longueur de la machine, R_{ext} le rayon externe de la machine et R_{int} le rayon interne du rotor (machine axiale).

Pour les applications basses vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse [6]. Ceci conduit à un meilleur couple volumique pour la machine à flux axial.

La machine synchrone à aimants permanents et à entrefer axial dite "discoïde" peut être constituée, dans sa structure élémentaire (étage), soit d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques, soit de deux disques rotoriques entourant le disque statorique comme le montre la figure II-10.

Un disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique

torique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle [4].

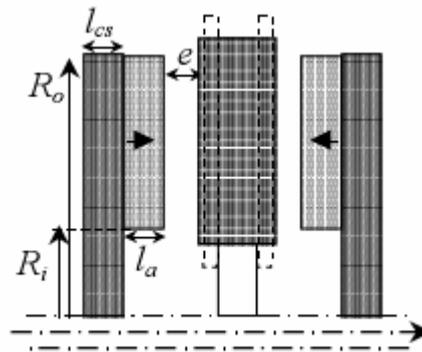


Figure II-11 : Etage d'une machine synchrone à aimants permanents discoïde

Un autre avantage de cette topologie est la possibilité d'assembler plusieurs machines sur un même axe afin d'accroître le couple. Un inconvénient de cette structure est que les forces d'attraction axiale entre le rotor et le stator peut contraindre à des renforcements mécaniques de la structure avec des conséquences sur le poids et le prix.

La machine discoïde utilise cette technologie et trouve des applications dans la propulsion navale. L'éolienne Jeumont J48 de 750 KW met en œuvre ce type de machine pour la vitesse variable à entraînement direct (grand nombre de pôles) [34].

- **Machines synchrones à flux radial**

Plusieurs MSAP à flux radial ont été proposées dans la littérature. La plupart sont à rotor intérieur [1], [2] mais certaines ont un rotor extérieur [20], [27]. Ce type de machine permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation [33].

La figure II-12 montre une MSAP classique à flux radial et à rotor intérieur.

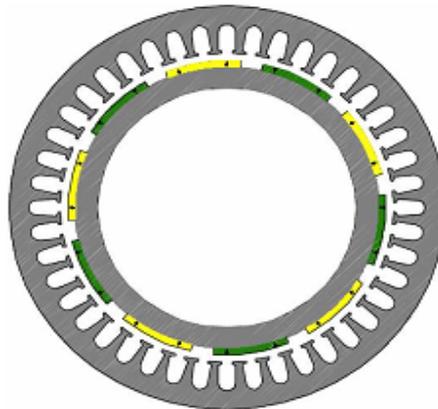


Figure II-12 : MSAP à flux radial

II.3.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor.

Les constructeurs préfèrent donc employer des générateurs synchrones à électroaimants, qui sont alimentés en courant continu obtenu après redressement du courant alternatif du réseau et transmis au rotor par l'intermédiaire d'un système de collecteur tournant [39].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive [3].

II.3.2 GENERATEURS ASYNCHRONES

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douée grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 90 les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique

de leurs aérogénérateurs. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant. Comme pour les machines synchrones- il existe différents types de machine asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins grands. Deux des désavantages principaux des machines à induction sont la consommation de puissance réactive et le courant élevé au démarrage, mais ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance [8].

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille [19].

Deux variantes de ces machines synchrones et asynchrones pourraient se développer dans les prochaines années : des générateurs synchrones à aimant permanent directement couplés à la turbine ou des générateurs asynchrones doublement alimentés au stator. Ce dernier n'est pas encore complètement au point mais aurait un avantage sur les générateurs asynchrones doublement alimentés (GADA) à rotor bobiné, puisqu'il n'a pas de bagues, élément des machines asynchrones à rotor bobiné demandant une certaine maintenance [8].

II.4 MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasé – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

II.4.1 LES HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes [17]:

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires.

II.4.2 MODELE EN ABC

Les équations électriques

Equations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques:

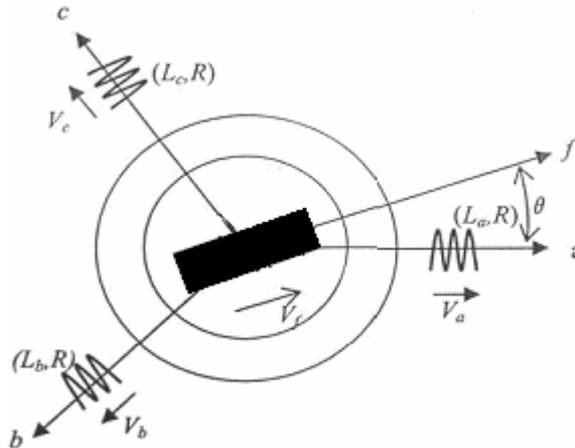


Figure II-13 : Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc

$$\begin{cases} v_a = R.i_a + \frac{d}{dt} \Psi_a \\ v_b = R.i_b + \frac{d}{dt} \Psi_b \\ v_c = R.i_c + \frac{d}{dt} \Psi_c \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

On désigne par Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c), et par (i_a, i_b, i_c) les courants qui circulent dans ces enroulements.

II.4.3 MODELE BIPHASE (TRANSFORMATION DE PARK)

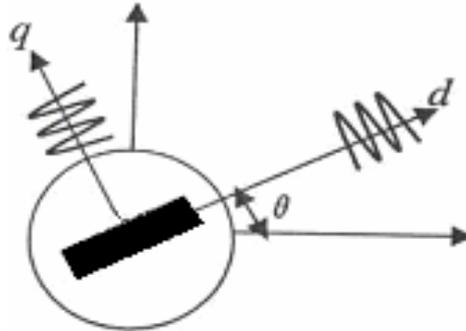


Figure II-14 : Modèle de la machine en biphase

A l'aide de transformation de PARK on passe de grandeurs réelle (V_a, V_b, V_c) et (i_a, i_b, i_c) à leurs composantes (V_o, V_d, V_q) et (i_o, i_d, i_q) .

La matrice de PARK s'exprime par [16]

$$[P_3(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Si le neutre de la machine synchrone est isolé (non relié à la terre) alors :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II-15})$$

Dans ce cas la composante homopolaire est nulle. La matrice de transition de PARK devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Et sa matrice inverse sera exprimée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

Equations électriques :

La figure II-6 représente les trois enroulements statoriques fixes, et le rotor à aimants permanents.

On a :

$$[V_{dq}] = [P_2(\theta)] \cdot [V_s] \quad (\text{II-18})$$

$$[i_{dq}] = [P_2(\theta)]^{-1} \cdot [i_s] \quad (\text{II-19})$$

Tel que :

$$\begin{bmatrix} V_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Après simplifications on aura [15]:

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \psi_q \cdot \omega_r \quad (\text{II-20})$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \psi_d \cdot \omega_r \quad (\text{II-21})$$

Avec :

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_f \quad (\text{II-22})$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (\text{II-23})$$

ψ_f : Flux des aimants permanents.

Les relations (II-21) et (II-22) deviennent alors :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot i_q \cdot \omega_r \quad (\text{II-24})$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d \cdot i_d + \Phi_f) \cdot \omega_r \quad (\text{II-25})$$

II.4.4 EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

L'expression générale du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [i_s] \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L] \right\} \cdot [i_s] \quad (\text{II-26})$$

Avec : $\theta_e = p \cdot \theta_m$

θ_e : L'angle électrique.

θ_m : L'angle mécanique.

p : Nombre de paires de pôles.

Après développement et simplification on trouve :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (\text{II-27})$$

En remplaçant Φ_d et Φ_q par leurs valeurs on trouve :

$$C_{em} = p \cdot ((L_d - L_q) \cdot i_d + \Phi_f) \cdot i_q \quad (\text{II-28})$$

II.4.5 L'EQUATION MECANIQUE

L'équation mécanique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II-29})$$

$$\Omega = \frac{\omega r}{p} \quad (\text{II-30})$$

ωr : Vitesse angulaire (pulsation électrique)

Ω : Vitesse mécanique.

C_r : Couple de charge.

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.5 MODELE DE L'ONDULEUR DE TENSION

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération. Les interrupteurs

(K1, K4), (K2, K5), (K3, K6) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source [29], [15]. Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique est illustré par la figure II-15.

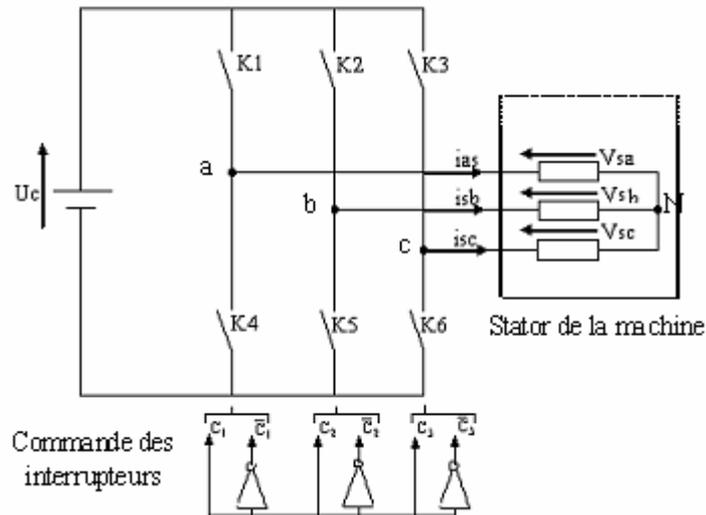


Figure II-15 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator de la machine.

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur on supposera que les interrupteurs sont idéaux (temps de commutation nul, pertes négligeables), la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

L'objectif de la commande est de trouver la bonne combinaison de contrôle des interrupteurs, de façon à reconstituer la forme de 3 signaux sinusoïdaux. Soit CK , les signaux de commande des bras K de l'onduleur ; avec $K \in \{1,2,3\}$.

$CK = 1$ Si l'interrupteur en haut d'un bras est fermé et celui en bas est ouvert ;

$CK = 0$ Si l'interrupteur en haut est ouvert et celui en bas est fermé.

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée, ($V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = 0$) alors :

$$\begin{cases} V_{aN} = V_{sa} = \frac{U_c}{3} (2.C_1 - C_2 - C_3) \\ V_{bN} = V_{sb} = \frac{U_c}{3} (2.C_2 - C_1 - C_3) \\ V_{cN} = V_{sc} = \frac{U_c}{3} (2.C_3 - C_2 - C_1) \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

Sous formes matricielle :

$$[C_K] = [C_1 \ C_2 \ C_3]; \quad [V_{sabc}] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}] \quad (\text{II-32})$$

Où V_{sabc} est le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur, donné par:

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = U_c \cdot [T_s] \cdot [C_K] \quad (\text{II-33})$$

II.6 MODELE DU REDRESSEUR

La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant. Les modèles élaborés pour les onduleurs de tension à deux niveaux sont valables pour les redresseurs de tension en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources (réseaux et la charge).

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes (figure II-16). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs.

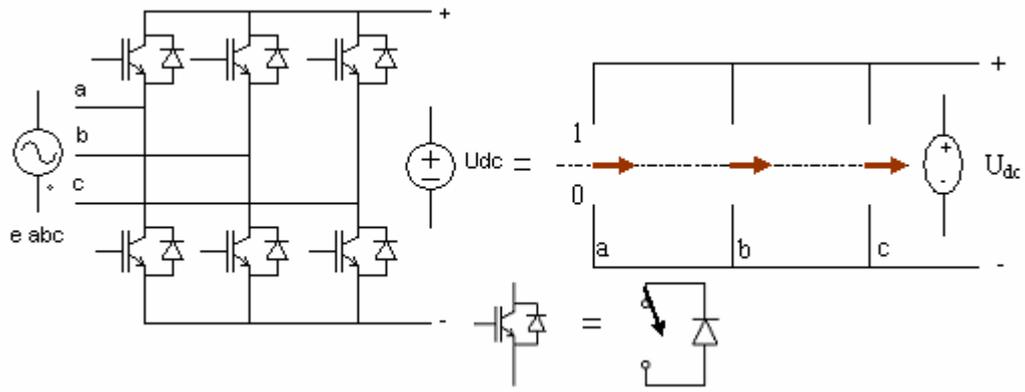


Figure II-16 : Pont redresseur.

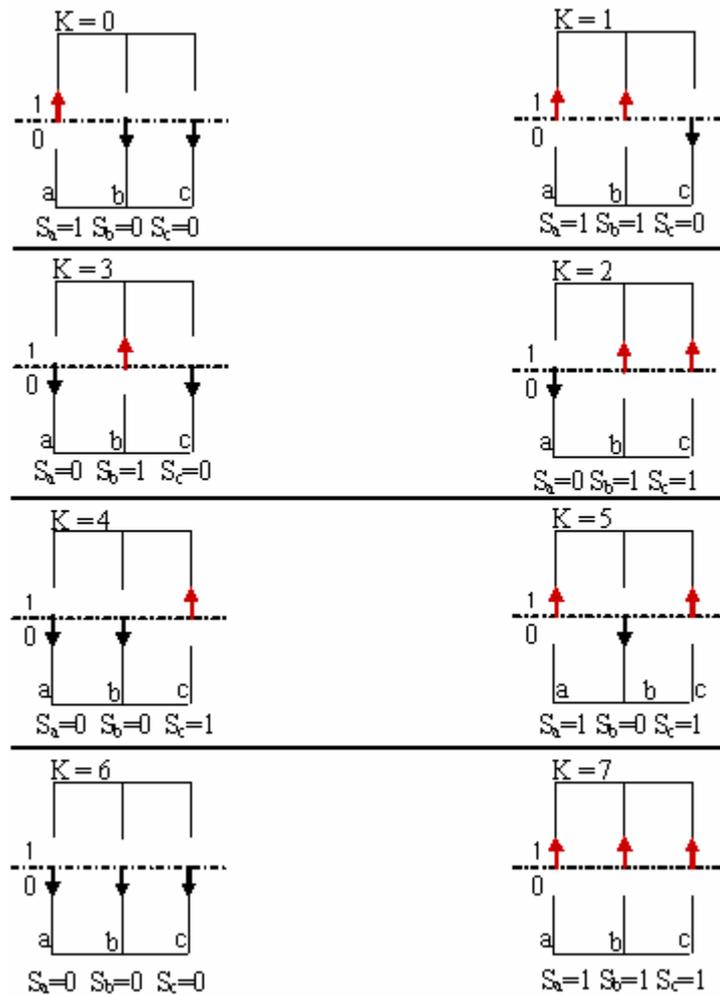


Figure II-17 : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

K	S _a	S _b	S _c	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
0	1	0	0	u _{dc}	0	- u _{dc}
1	1	1	0	0	u _{dc}	- u _{dc}
2	0	1	0	- u _{dc}	u _{dc}	0
3	0	1	1	- u _{dc}	0	u _{dc}
4	0	0	1	0	- u _{dc}	u _{dc}
5	1	0	1	u _{dc}	- u _{dc}	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (II-1) : les huit états possibles des interrupteurs.

De cette table on peut écrire les tension d'entrée redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{aligned}
 v_{ab} &= (s_a - s_b)U_{dc} \\
 v_{bc} &= (s_b - s_c)U_{dc} \\
 v_{ca} &= (s_c - s_a)U_{dc}
 \end{aligned}
 \tag{II-34}$$

D'où l'on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{aligned}
 v_a &= f_a U_{dc} \\
 v_b &= f_b U_{dc} \\
 v_c &= f_c U_{dc}
 \end{aligned}
 \tag{II-35}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 f_a &= \frac{2s_a - (s_b + s_c)}{3} \\
 f_b &= \frac{2s_b - (s_a + s_c)}{3} \\
 f_c &= \frac{2s_c - (s_a + s_b)}{3}
 \end{aligned}
 \tag{II-36}$$

II.7 LA COMMANDE M.L.I

Cette méthode consiste à comparer trois tensions de références sinusoïdales (modulatrices) propres à chaque phase à un signal triangulaire (porteuse) commun pour les trois phases.

On a:

$$V_{réf}(i) = V_{réf\ max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_m \cdot t - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-37})$$

Avec: $i = 1,2,3$.

$V_{réf\ max}$: Amplitude de la tension de référence.

f_m : Fréquence des modulatrices.

Cette largeur d'impulsion dépend uniquement de la valeur de la tension de référence au début de l'échantillonnage, ce qui facilite la réalisation pratique de cette méthode de modulation par des algorithmes numériques [29].

Les instants de commutation t_1 et t_2 sont déterminés comme suit :

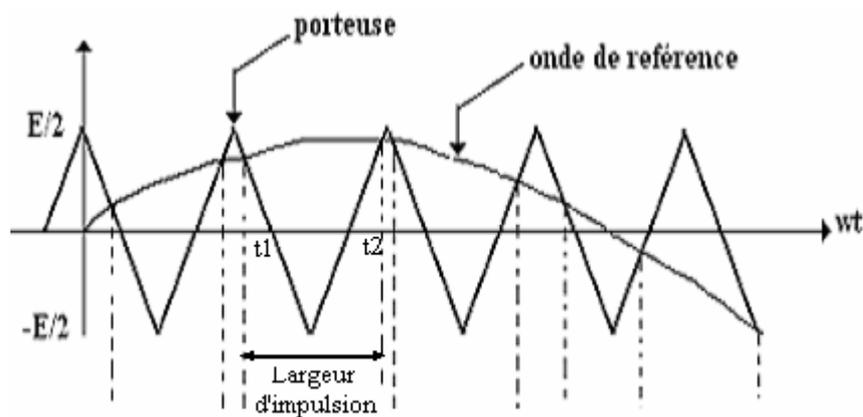


Figure II-18 : Détermination des instants d'échantillonnage.

II.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a passé en revue la machine synchrone et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et la commande M.L.I.

Le chapitre suivant est consacré à la simulation utilisant le logiciel Simulink/Matlab des différentes parties de la chaîne de conversion et de la chaîne globale.

CHAPITRE 3 : Simulation de la chaîne de production d'énergie éolienne

III.1 Introduction	51
III.2 Simulation de la chaîne globale	51
III.2.1 Turbine	51
III.2.2 Machine synchrone à aimant permanent	52
III.2.3 Redresseur	52
III.2.4 Onduleur	53
III.2.5 La commande MLI	54
III.3 Résultats de simulation	54
III.3.1 Vitesse constante	55
III.3.2 Vitesse variable	58
III.4 Simulation de la commande MLI	60
III.5 Conclusion	62

III.1 INTRODUCTION

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide des logiciels Matlab-Simulink.

Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande.

A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

III.2 SIMULATION DE LA CHAÎNE GLOBALE

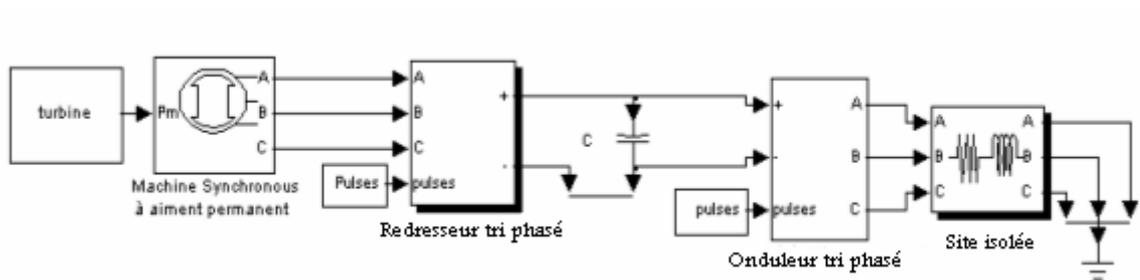


Figure III-1 : Structure globale de la chaîne de conversion.

III.2.1 Turbine

La turbine est entraînée par une MSAP, dont le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté dans la figure III-2.

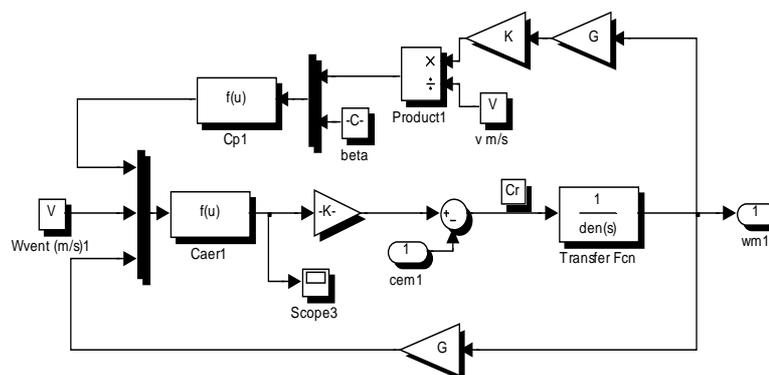


Figure III-2 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink).

III.2.2 Machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimant permanent est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. On utilise une MSAP pour convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de 3.82 KW. Son schéma bloc est représenté dans la figure III-4.

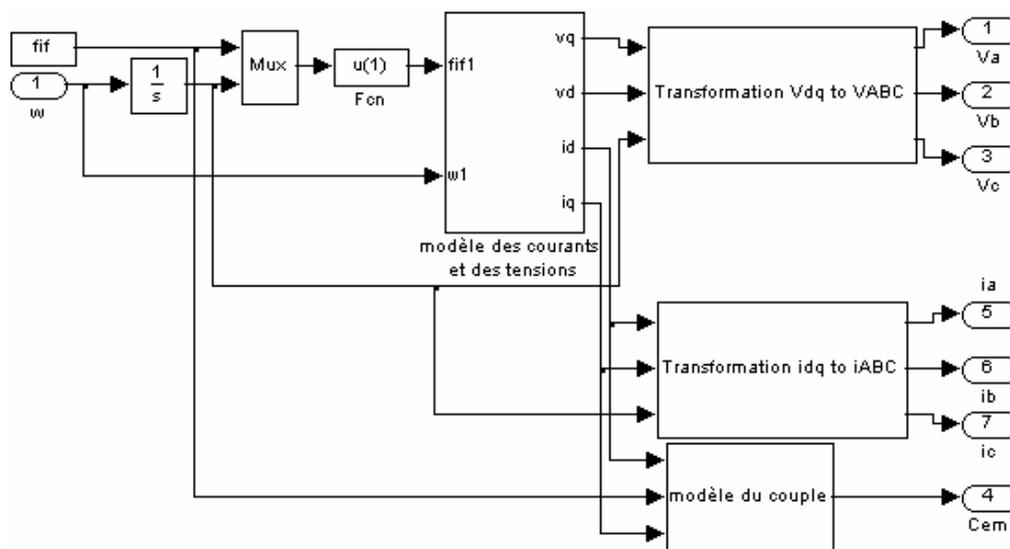


Figure III-4 : Machine synchrone à aimant permanent.

III.2.3 Redresseur

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Le schéma bloc est représenté dans la figure III-5.

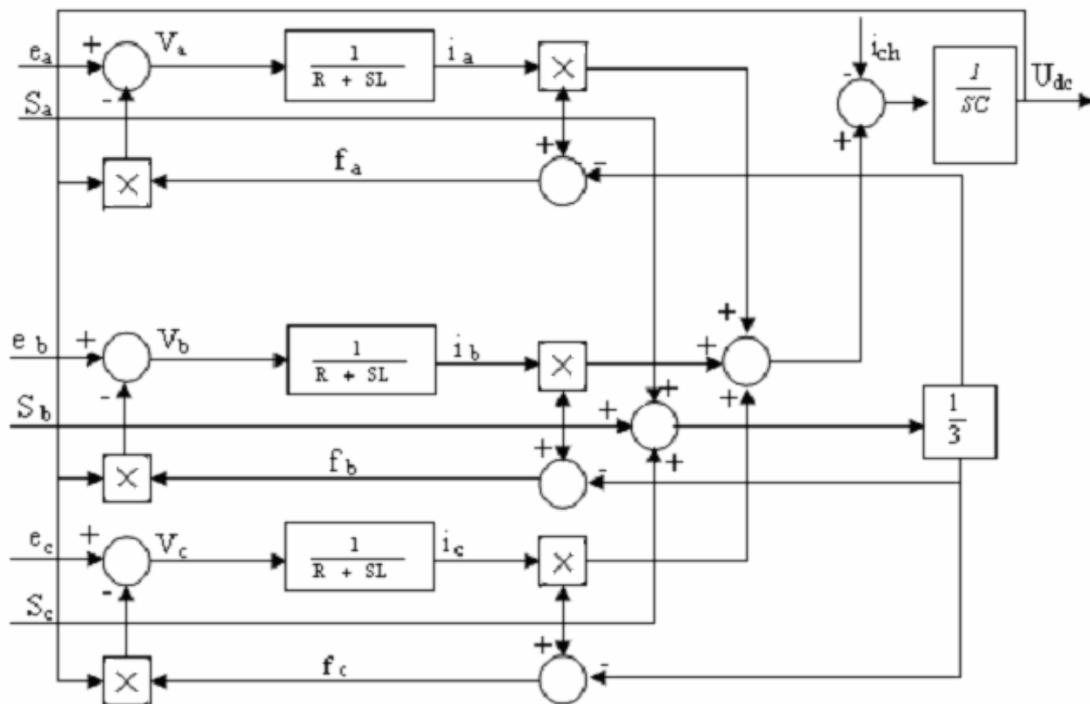


Figure III-5: Le schéma fonctionnelle de redresseur dans le repère abc

III.2.4 Onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. Le séquencement imposé aux interrupteurs statiques permet de réaliser un choix précis du vecteur de tension à appliquées à la charge. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération.

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur, on supposera que les interrupteurs sont idéaux (temps de commutation nul, pertes négligeables), la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé [18], [10].

Le schéma du modèle de l'onduleur est illustré par la figure III-6.

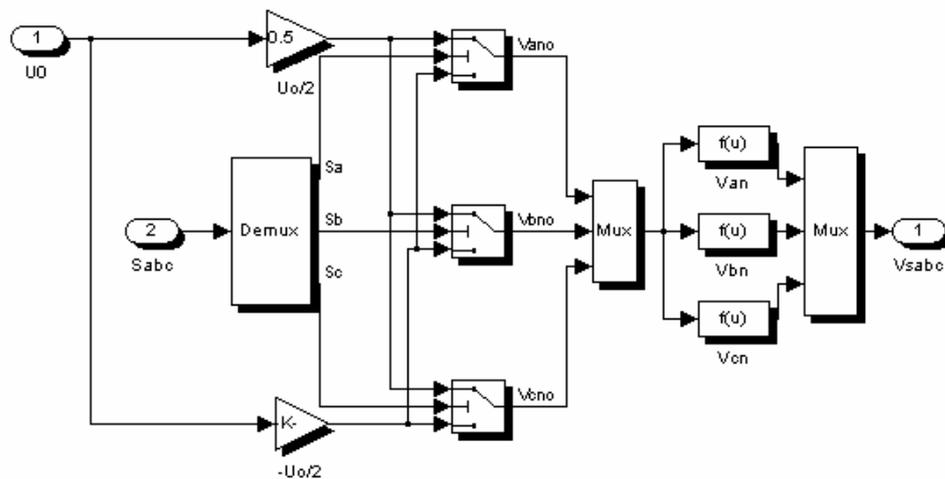


Figure III-6 : Modèle de l'onduleur de tension.

III.2.5 La commande MLI

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire compare trois modulatrices sinusoïdales décalées de 120° entre elles avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. Le modèle mathématique de la commande MLI présentée en utilisant le logiciel Matlab/Simulink est illustré par la figure III-7.

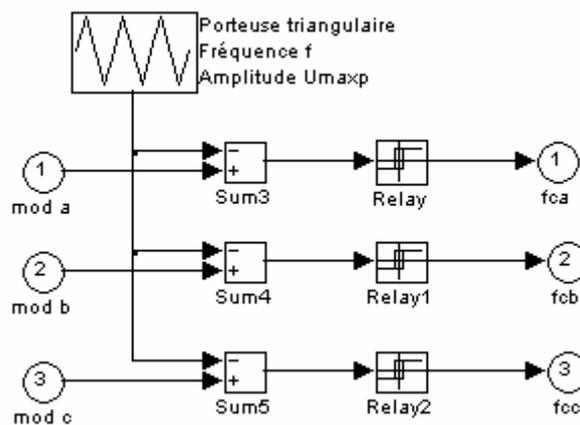


Figure III-7 : Modèle de la commande MLI à porteuse triangulaire

III.3 RESULTATS DE SIMULATION

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne reposant sur la machine synchrone à aimant permanent obtenus sous Matlab/Simulink sont présentés, (à partir des paramètres fournis en annexe).

III.3.1 VITESSE CONSTANTE

Nous avons connecté notre MSAP à une turbine à vitesse mécanique constante, égale à peu près à 157 rad/s (1500 tr/mn), après un régime transitoire de 0.1 s (figure III-7).

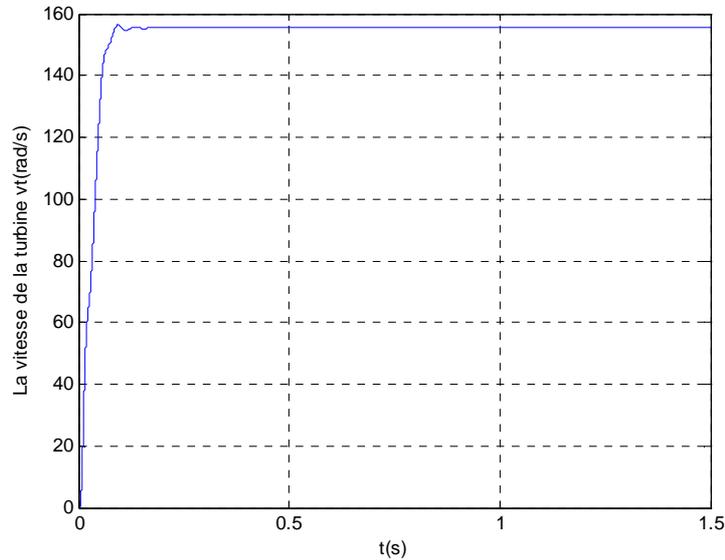


Figure III-7 : Vitesse de la turbine v_t [rad/s].

Après simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent, on obtient :

La tension composée de la génératrice est illustrée par la figure III-8. Elle est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 114 V avec une période 40 ms (100 Hz). La tension simple correspondante est de ± 66 V.

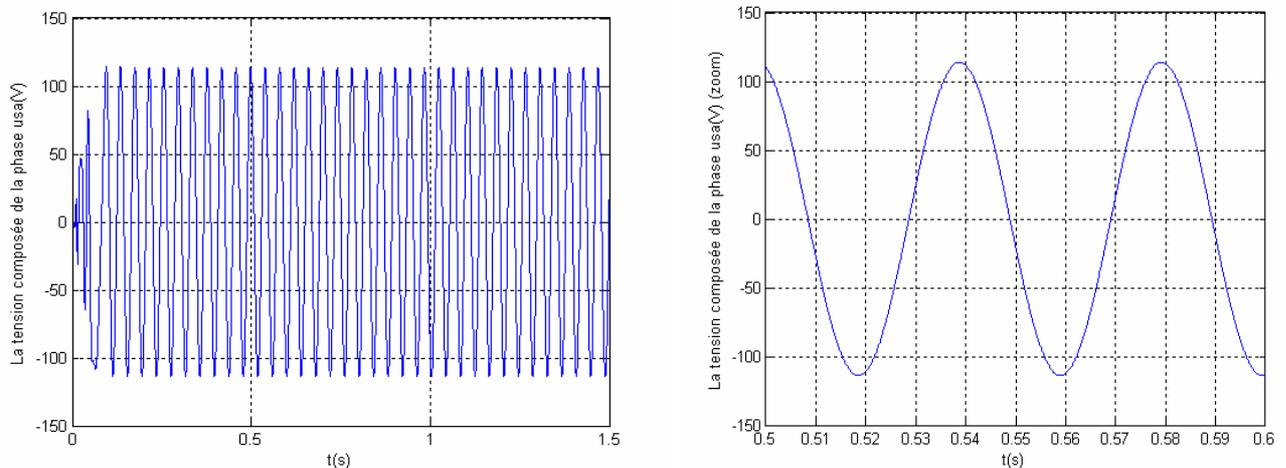


Figure III-8 : Tension composée de la génératrice.

L'allure du courant de phase de la génératrice est illustrée par la figure III-9. Il est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 25 A, avec une période 40 ms (100 Hz).

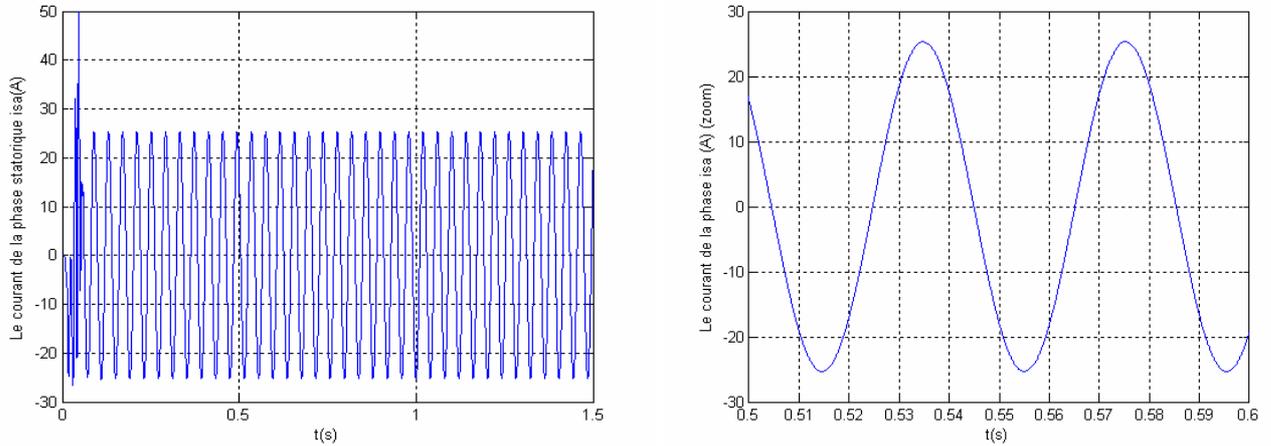


Figure III-9 : Courant de phase de la génératrice.

La figure III-10 représente la tension V_{red} redressée par le pont (U_{dc} dans le schéma bloc). On observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 96 V, après un régime transitoire de 0.04 s.

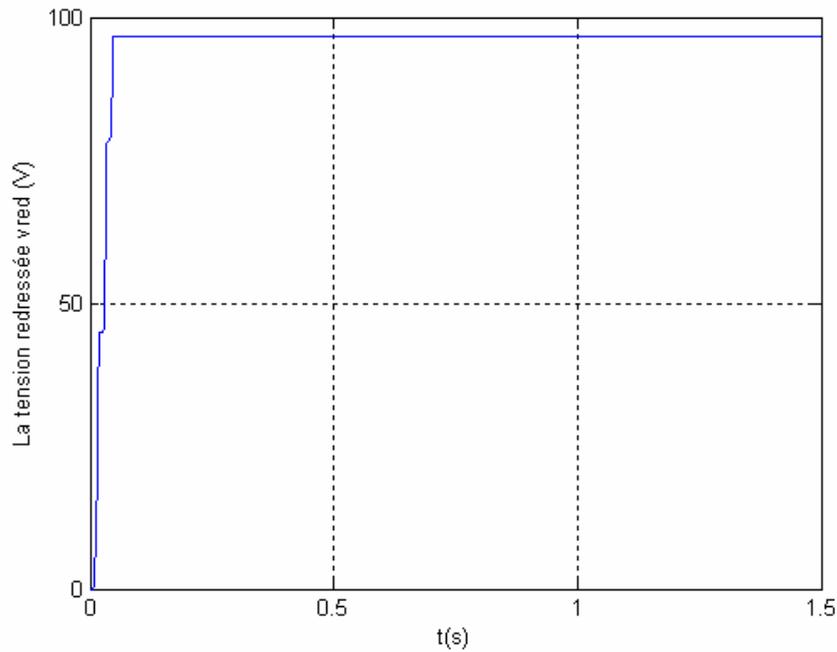


Figure III-10 : La tension redressée V_{red} (V).

Les tensions et les courants de la charge (RL), après ondulation, sont présentés dans les figures suivantes :

L'allure du courant de la charge ($R= 0.3 \text{ Ohms}$, $L= 4 \cdot 10^{-3} \text{ H}$) est illustrée dans la figure III-11. C'est un courant variable sinusoïdal, de $\pm 42 \text{ A}$, avec une période de 20 ms (50 Hz).

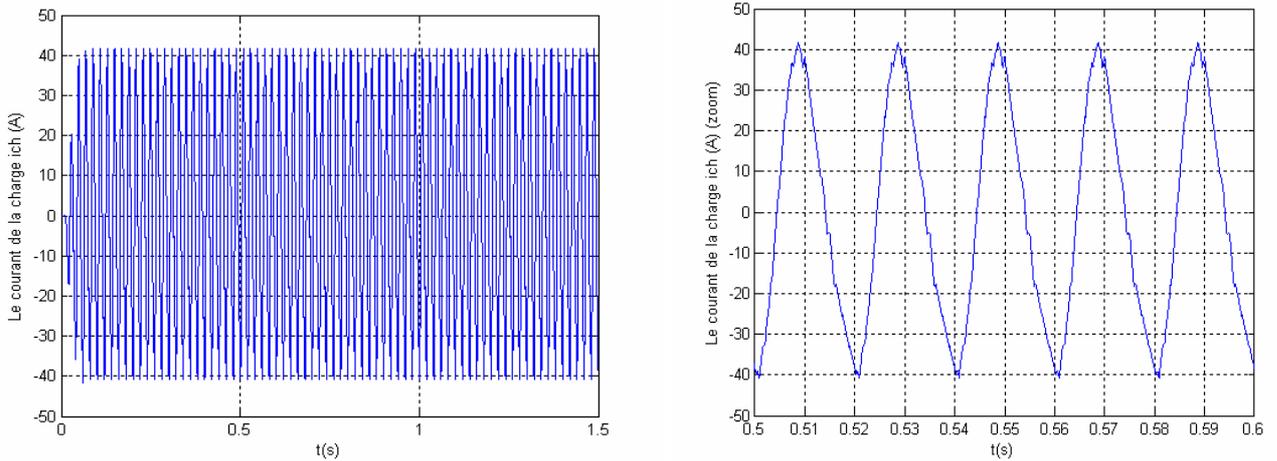


Figure III-11 : Courant de la charge ich (A).

La figure III-12, représente la tension aux bornes de la charge. C'est une tension alternative variant entre $\pm 64 \text{ V}$, avec une période de 20 ms (50 Hz).

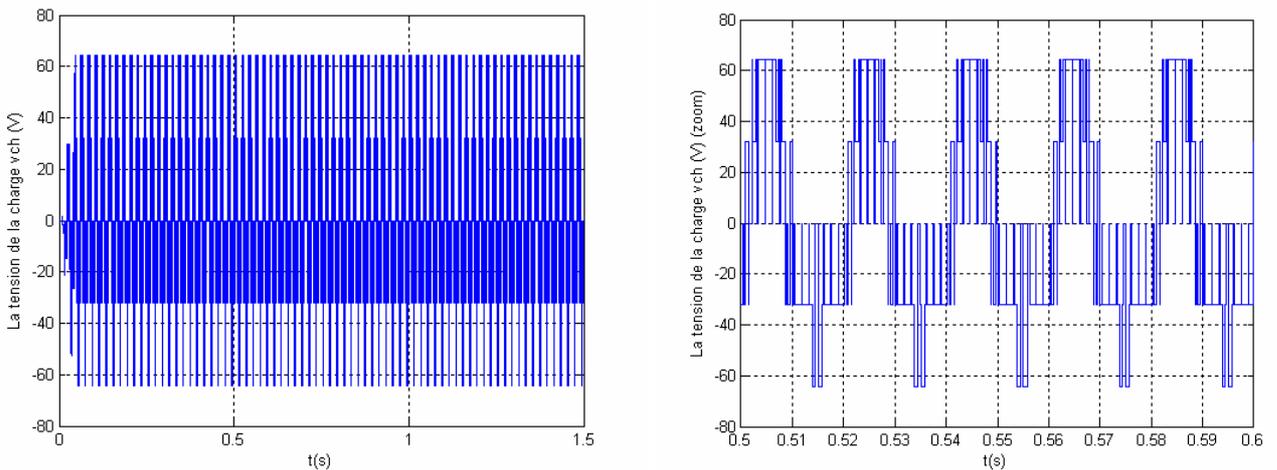


Figure III-12 : Tension aux bornes de la charge Vch (V).

III.3.2 VITESSE VARIABLE

Nous avons connecté notre MSAP maintenant à une turbine à vitesse mécanique variable, fluctuant entre 149 rad/s (1423 tr/mn) et 154 rad/s (1471 tr/mn), après un régime transitoire de 0.1 s (figure III-13).

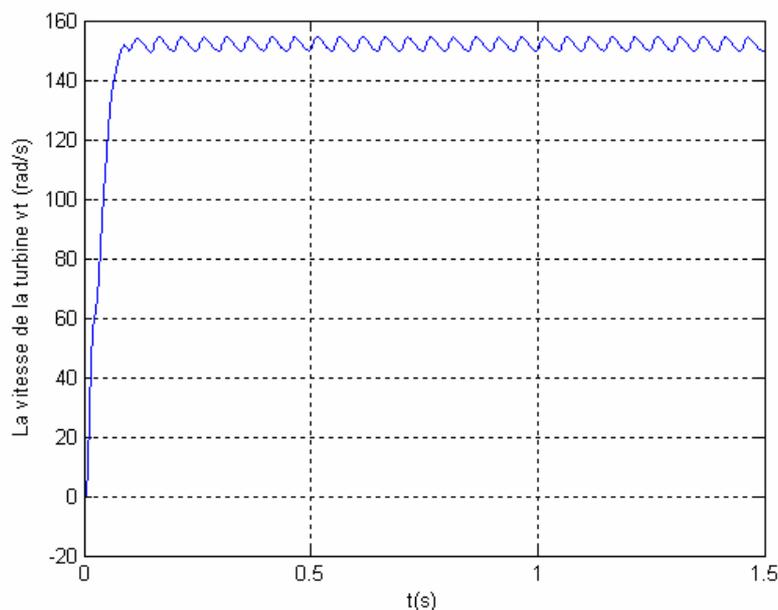


Figure III-13 : Vitesse de la turbine $v_t(t)$.

Dans la figure III-14 on illustre l'allure du courant de phase résultant de la génératrice. C'est un courant de la forme sinusoïdale avec une variation de 25 A et 27 A.

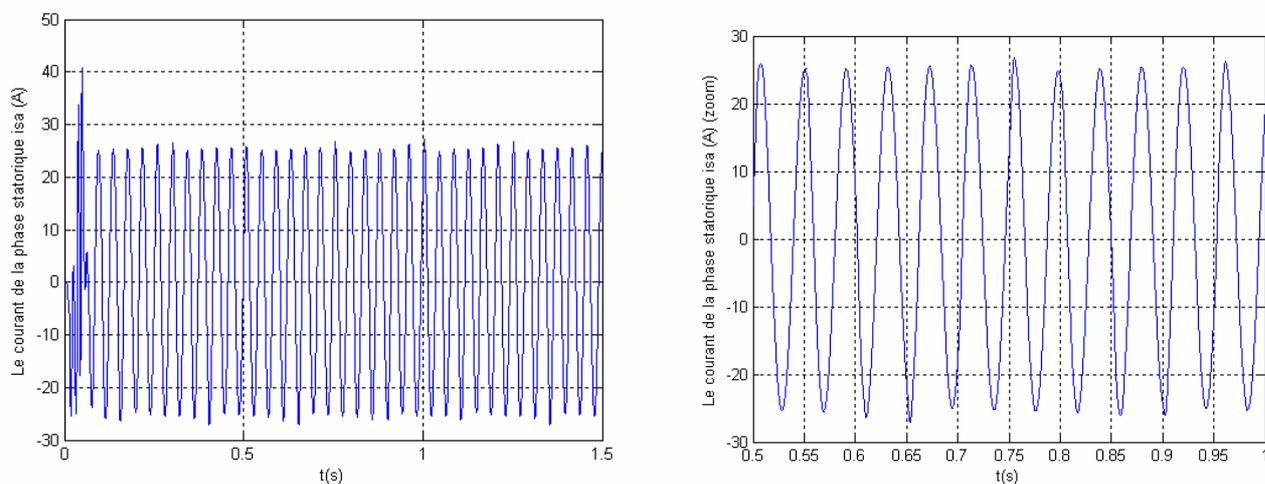


Figure III-14 : Courant de phase de la génératrice.

La tension composée de la génératrice est illustrée par la figure III-15. Elle est de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 112 V avec une période 40 ms (100 Hz). La tension simple correspondante est de ± 65 V.

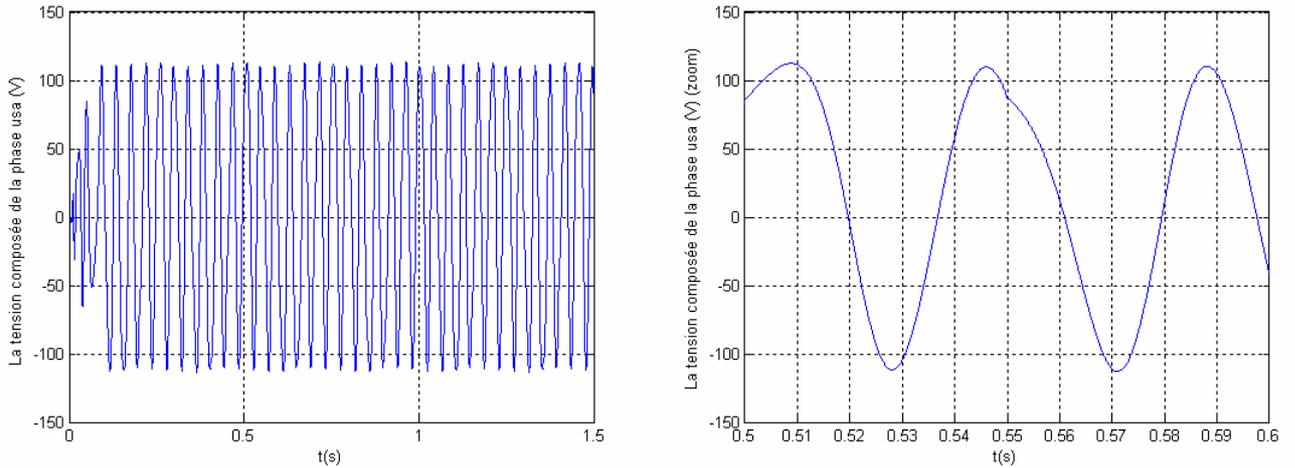


Figure III-15 : Tension composée de la génératrice.

La figure III-16 représente la tension V_{red} redressée par le pont (U_{dc} dans le schéma bloc). On observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 81 V, après un régime transitoire de 0.04s.

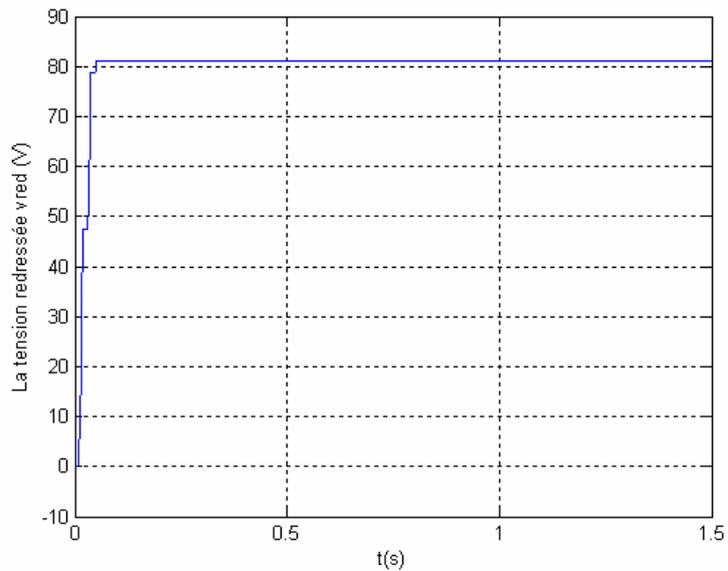


Figure III-16 : La tension redressée V_{red} (V).

L'allure du courant de la charge ($R= 0.3 \text{ Ohms}$, $L= 4*10^{-3} \text{ H}$) est illustrée dans la figure III-17. C'est un courant variable sinusoïdal, de $\pm 35 \text{ A}$, avec une période de 20 ms (50 Hz).

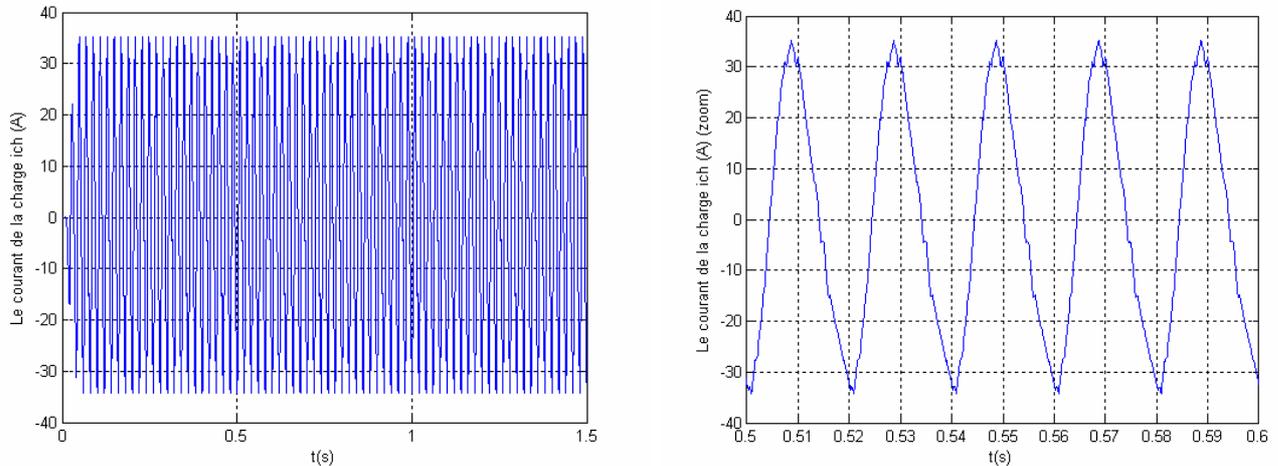


Figure III-17 : Courant de la charge i_{ch} (A).

La figure III-18, représente la tension aux bornes de la charge. C'est une tension alternative variant entre $\pm 54 \text{ V}$, avec une période de 20 ms (50 Hz).

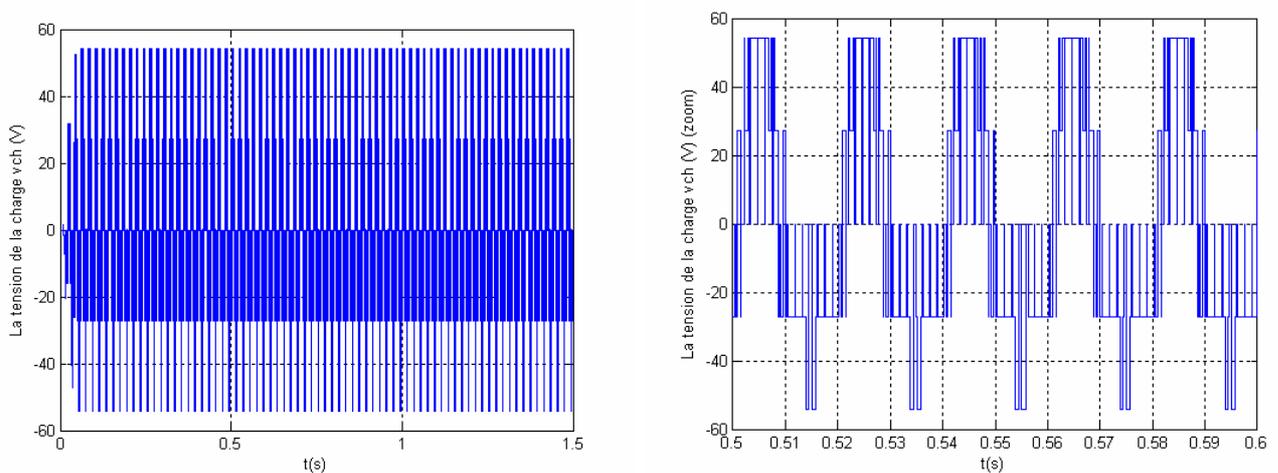


Figure III-18 : La tension aux bornes de la charge V_{ch} (V).

III.4 SIMULATION DE LA COMMANDE MLI

La MLI permet de former chaque alternance de la tension de sortie à partir de plusieurs créneaux. La commande MLI régit de la comparaison d'un signal triangulaire unipolaire de fréquence

1kHz et une amplitude égale à 1 avec un signal de référence sinusoïdale à amplitude égale à 0.8 et une fréquence de 50Hz.

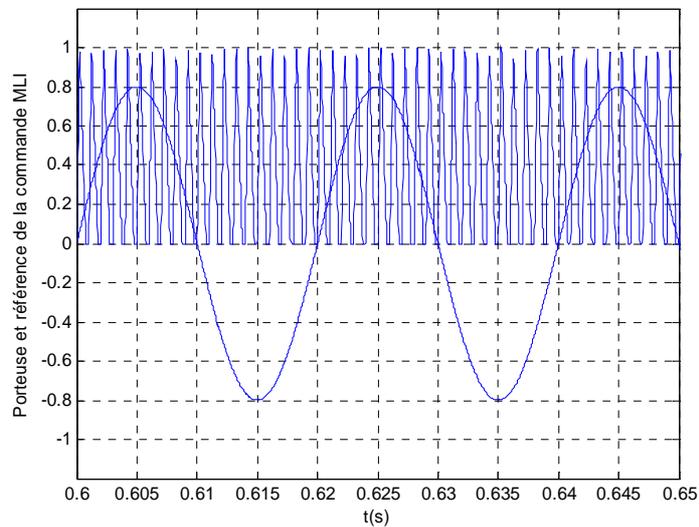


Figure III-19 : Comparaison de signal triangulaire et la référence sinusoïdale.

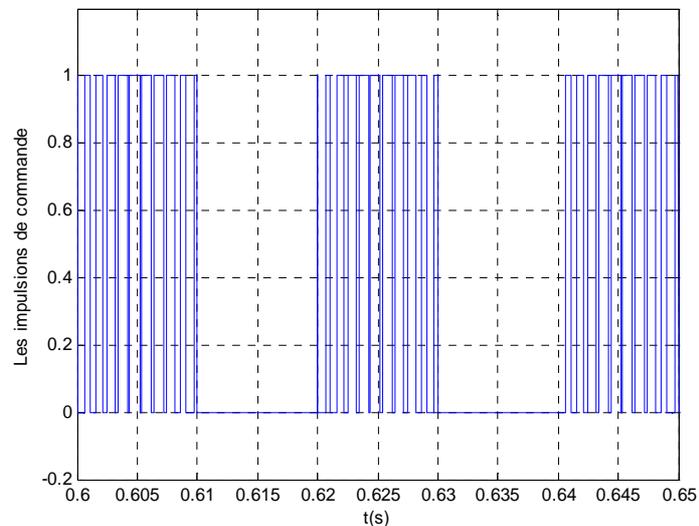


Figure III-20 : Signal de commande MLI.

La figure III-19, III-20, représente la comparaison entre la porteuse triangulaire et une référence sinusoïdale (Figure III-19), et le signal de commande résultant (Figure III-20).

III.5 CONCLUSION

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne et décrit les différentes chaînes de conversion d'énergie éolienne en présentant les résultats de simulation avec des commentaires pour chaque courbe obtenue.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent avec des convertisseurs statiques de puissance dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleurs solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.

Dans un second temps, nous avons abordé la description des machines électriques (en s'intéresse à la machine synchrone à aimants permanents), on a passé en revue la machine synchrone et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et la commande M.L.I.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation.

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque –diesel)...etc.
- Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.
- Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
- Etudier la gestion des systèmes, c.à.d réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.
- Appliquer des techniques de commande intelligents tels que la logique floue et les réseaux de neurones.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.G. Kladas, M. P. Papadopoulos, J. A. Tegopoulos, « Multi-pole permanent magnet generator design for gearless wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol. 1, pp. 387-394.
- [2] A. Graueurs, « Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines », Chalers university of technology, school of electrical and computing engineering, technical report, N° 292, Göteborg, Sweden, 1996, doctoral thesis.
- [3] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [4] A.S. Neris, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, « A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems », IEEE transactions on energy conversion, vol. 14, N° 1, march 1999, pp. 122-127.
- [5] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3^{ème} situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei N°36 mars 2004, pp. 1-14.
- [6] B. Multon, J. Bonal, « Electromechanical direct drives: variety, constraints and solutions », CEMD'99, ENS Cachan, 04/02/99.
- [7] B. Raison, A. Morales, M. Crappe, « L'énergie électrique éolienne, partie I : présentation générale et approche probabilistique », revue internationale de génie électrique, vol. 5/3-4 – 2002, pp. 405-484.
- [8] C. Haritza, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Doctorat, E.N.S.A.M Paris, décembre 2003.
- [9] Communication à l'académie des technologie pour un progrès résonné de Bernard Tardieu ; « Rapport énergie hydraulique éolienne », novembre 2005.
- [10] Djamel Belhadj « Commande directe en couple d'une machine asynchrone-structures d'observation- application aux systèmes multi machines- multi convertisseurs », thèse doctorat, école nationale d'ingénieurs de Tunis, 2001.
- [11] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis, november 5-8, 1998.
- [12] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat, 19 Décembre 2003, école polytechnique de l'université de Nantes.

- [13] Gaad M, « Modélisation et réalisation d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. Application à la conduite de la machine asynchrone », mémoire de magister, EMP 2000 Alger.
- [14] Gabriel-Octavian Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens », thèse doctorat, E.N.S.A.M, centre de Lille, 2005.
- [15] Guy Sturtzer Eddie Smigiel, « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Ellipses édition marketing S.A. 2000.
- [16] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [17] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat, 18 décembre 2003, E.N.S.A.M, centre de Bordeaux.
- [18] Ismail El Hassan « Commande haute performance d'un moteur asynchrone sans capteur de vitesse par contrôle direct du couple », thèse préparée au laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de l'ENSEEIH, Toulouse 1999.
- [19] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly-coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [20] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [21] Liuchen Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian review - summer / été 2002, pp. 1-5.
- [22] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.
- [23] L. Moreau, « Modélisation conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, de l'université de Nantes, le 9 décembre, 2005.
- [24] L. Söderlund, JT. Erikson, J. Salonen, H. Vihriälä and R. Perälä, « A permanent-magnet generator for wind power applications », IEEE transaction on magnetics, vol 32, N° 4, july 1996.
- [25] M. Ivan, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance », laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).
- [26] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaim, G. Barakat, N. Takorabet, C. Chillet, D. Matt, S. Taibi, A. Tounzi, C. Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, « Comparaison de structures électromagnétiques pour des

applications à faible vitesse et fort couple », RS serie RIGE - 08/2005, maîtrise de l'énergie électrique, pp 259 à 286.

[27] M. R. Dubois, H. Polinder, J.A. Ferreira, « Comparison of generator topologies for wind turbine », proceeding of the Nordic Country Power and Industrial Electronics conference (NORPIE), 2000.

[28] M. S. Djebbar, « Etude comparative des redresseurs cascades et multi niveaux à commande MLI », mémoire magistère, université Mentouri Constantine, 2005.

[29] 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.

[30] O'Connor M, Gallopin G-C., Funtowicz S., Ravetz J, « La science pour le XXIe siècle : du contrat social aux fondements scientifiques », revue internationale des sciences sociales, N°168, juin 2001.

[31] O. Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ».

[32] P. Lampola, « Direct driven, low speed permanent magnet generator for wind power applications », acta polytechnica scndinaviica, electrical engineering series, N° 101, ESPOO 2000, published by the Finnish academies of technology.

[33] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.

[34] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.

[35] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.

[36] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.

[37] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[38] Technique de l'ingénieur BM 4 640.

[39] Technique de l'ingénieur D 3 960.

[40] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.

[41] T.J. Hammons, M. Willingham, K.N. Mak, M. Silva, M. Morozowski, B.K.Blyden, « Generation and transmission improvements in developing countries », IEEE transactions on energy conversion, vol. 14, N°. 3, September 1999, pp. 760-765.

[42] T. Rovio, H. Vihriälä, L. Söderlund, J. Kriikka, and M. Hyppönen, « A permanent-magnet generator for wind power applications », EWEC 2001, Copenhagen, 1- 7 July 2001.

[43] T. Weigel, «Demagnetization effect in synchronous machine with permanent magnets», proceedings of the 33rd international symposium on electrical machines, 1997, pp 99-104. Thèse ENS de Cachan, décembre 2002.

[44] Technique de l'ingénieur (Wetzer. P. Machines synchrones. Excitation), [D 3 545] 02-1997.

[Site 1] Site Internet « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, <http://www.arenidf.org>

[Site 2] Site Internet, www.rncan.gc.ca/penser. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.

Annexe

Paramètres du générateur synchrone :

Génératrice SMV142 UM 30. [14]

$K_t = 1.6 \text{ N.m/A.rms}$, $K_e = 0.94 \text{ V.rms/K.min}^{-1}$

Couple nominal 12.2 N.m .

Puissance nominale 3.82 kW .

Résistance statorique $R_s = 0.94\Omega$.

Inductance directe $L_{ds} = 8.30\text{mH}$.

Inductance transversale $L_{qs} = 8.30\text{mH}$.

$L_{ss} = 0.00148\text{mH}$.

Nombre de paires de pôles $p_s = 6$.

Coefficient de la force électromotrice $K_e = 0.94$.

Paramètres de la turbine :

Puissance nominale : $P_n = 3.5 \text{ kW}$.

Rayon de l'éolienne : $R = 2.04\text{m}$.

Gain du multiplicateur de vitesse : $G = 35$.

Inertie de l'arbre : $J = 0.5 \text{ kg.m}^2$.

Vitesse du vent : $v = 10 \text{ m/s}$.

SOMMAIRE

Introduction générale -----	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens	
I.1 Introduction -----	4
I.2 Les principales sources d'énergies renouvelables-----	4
I.2.1 Génération de la chaleur-----	4
I.2.2 Génération d'électricité-----	8
I.3 Principes et éléments constitutifs de l'éolien -----	12
I.3.1 Définition de l'énergie éolienne -----	12
I.3.2 Descriptif d'une éolienne -----	12
I.3.3 Principaux composants d'une éolienne-----	14
I.3.4 Le principe de fonctionnement d'une éolienne-----	17
I.4 Les différents types d'éoliennes-----	18
I.4.1 Eoliennes à axe vertical -----	20
I.4.2 Eoliennes à axe horizontal -----	21
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne -----	22
I.5.1 Les avantages-----	22
I.5.2 Les inconvénients-----	23
I.6 Conclusion-----	25
Chapitre II : Etude et modélisation d'une chaîne de production d'énergie éolienne	
II.1 Introduction-----	26
II.2 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique -----	26
II.2.1 Loi de Betz-----	26
II.2.2 Le multiplicateur -----	29
II.2.3 Equation dynamique de l'arbre -----	30
II.3 Type de machine électrique-----	31
II.3.1 Générateur synchrone-----	31

II.3.1.1 Machine synchrone à aimants permanents -----	34
II.3.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné-----	38
II.3.2 Générateur asynchrone-----	38
II.4 Modélisation de la machine synchrone a aimants permanents -----	39
II.4.1 Les hypothèses simplificatrices-----	40
II.4.2 Modèle en abc -----	40
II.4.3 Modèle biphasé (transformation de Park) -----	41
II.4.4 Expression du couple électromagnétique-----	43
II.4.5 L'équation mécanique-----	44
II.5 Modèle de l'onduleur de tension-----	44
II.6 Modèle du redresseur -----	46
II.7 La commande M.L.I -----	49
II.8 Conclusions -----	50
 Chapitre III : Simulation de la chaîne de production d'énergie éolienne	
III.1 Introduction -----	51
III.2 Simulation de la chaîne globale -----	51
III.2.1 Turbine-----	51
III.2.2 Machine synchrone à aimant permanant-----	52
III.2.3 Redresseur-----	52
III.2.4 Onduleur-----	53
III.2.5 La commande MLI-----	54
III.3 Résultats de simulation -----	54
III.3.1 Vitesse constante-----	55
III.3.2 Vitesse variable-----	58
III.4 Simulation de la commande MLI-----	60
III.5 Conclusion-----	62
 VI. Conclusion générale-----	 63

إن مصادر الطاقات في المناطق المعزولة والمحرومة المتجددة، التي تمكننا من إنتاج الطاقة الكهربائية، تؤدي إلى حل مشاكل توزيع الكهرباء من كل مصادر الطاقة، وتحسين مستواهم المعيشي.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة سلسلة لتحويل طاقة الرياح و التي تعتمد على مبدأ مولدة متزامنة ذات مغناطيس دائم في منطقة معزولة. في البداية قمنا بمحاكات النموذج لكل طابق من السلسلة المقترحة لمختلف المكونات لهذه السلسلة و كذلك إيصال هذه المكونات لتشكيل النموذج الكامل بواسطة نظام برمجة يدعى *Simulink/MATLAB* ان النتائج المتحصل عليها تسمح لنا بتحليل سلوك النظام الذي يعطينا كل المعلومات من اجل وضع نظام تحكم و مراقبة دقيقة.

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Ce mémoire traite de la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents destiné à un site isolé. Dans un premier temps, un modèle de chaque étage constituant la chaîne de conversion est proposé. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du dispositif éolien et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Abstract

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy.

This memory calls the simulation of a wind energy conversion chains to basis a generator synchronous of permanent magnets for an isolated site. In a first time, a model of every floor constituting the chain of conversion is proposed. The different constituent of the chains of conversion are then connected between them in order to form the complete model that is implement in the Matlab environment. The results of simulation gotten permit to analyze the behaviour of the wind device and provide some information capable to be useful to the setting in work of a system of order and appropriate control.