

Université du Québec

Mémoire

PRÉSENTE À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITBI-TEMISCAMINGUE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE EN INGÉNIERIE

PAR

THAMER SAHBANI

MODÉLISATION, SIMULATION ET COMMANDE D'UN
SYSTÈME DE JUMELAGE ÉOLIEN/PHOTOVOLTAÏQUE À
GÉNÉRATRICE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

FEVRIER 2018



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

Le travail présenté porte sur la modélisation d'un système de jumelage éolien photovoltaïque alimentant une charge isolée. Le système comprend une éolienne, un panneau photovoltaïque et des batteries de stockage reliés sur un BUS DC et alimentant une charge dynamique. Les systèmes de jumelage basés sur les énergies renouvelables sont une tendance ces dernières années et cela en vue de remplacer la production des énergies classiques.

Afin d'aboutir au système de jumelage final, le travail est développé sur l'étude de quatre points importants. De premier abord nous étudions et modélisons les sources d'énergie à savoir le vent et l'ensoleillement, par la suite nous étudions les systèmes de conversion qui sont le module photovoltaïque et l'aérogénérateur en portant une attention spécifique sur la génératrice synchrone à aimants permanents comme troisième point. Finalement, nous portons le regard sur les équipements de conversion de puissance et les stratégies de commandes adéquates pour permettre d'avoir un rendement optimal du système de jumelage.

Les modèles développés ont été simulés via le logiciel Matlab/Simulink. Contrairement à la génératrice synchrone à aimants permanents dont nous avons pu effectuer des simulations au sein du laboratoire, les autres paramètres ont été extraits de la littérature des divers articles, mémoires et thèses consultés pour accomplir ce travail.

Abstract

The present work consist on modeling a wind-solar cogeneration system connected on an isolated load. The system includes a wind turbine, a solar panel and batteries as storage system in order to supplies an electrical load. Cogeneration systems based on renewable energy are currently very studied and developed.

In order to model the global cogeneration system, this work focus on four important points. At first we study the energy sources, wind and solar irradiation, then we will develop the conversion system, wind turbine and solar panel, we will focus on the permanent magnet synchronous generator. Finally we will study the control strategies and the power conversion systems.

The developed model were simulated using Matlab/Simulink. Unlike the PMSG for which experimental tests has been made, parameters for the wind turbine and solar panel were taken from literature.

Remerciement

Ce mémoire a été réalisé à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) avec l'aide et le soutien de nombreux intervenants qui ont contribué à sa réalisation. Aussi, nous tenons à les remercier, notamment :

En premier lieu, mon directeur de recherche, le Professeur René Wamkeue (ing, Ph.D), professeur titulaire à l'UQAT, pour m'avoir proposé le sujet d'étude, pour son soutien et ses conseils.

M. Jean-Jacques Beaudoin, Professionnel, chargé des Laboratoires à l'UQAT, pour sa disponibilité et son savoir-faire technique, mis en contribution pour la compréhension de nombreux concepts pratiques.

Mes coéquipiers au groupe de recherche GREENG, pour leurs disponibilités et leurs savoir-faire techniques, mis en contribution pour la compréhension de nombreux concepts dans le domaine d'électrique et d'électronique de puissance.

Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé et permis de réussir à accomplir ce travail de façon direct ou indirect.

Table des matières

1. Introduction générale.....	1
1.1. Contexte socio-économique.....	2
1.2. Le jumelage.....	4
1.3. Problématique	6
1.4. Méthodologie	7
2. Chapitre 2 Étude et Modélisation de l'éolienne et du panneau photovoltaïque	9
2.1. Modélisation des aérogénérateurs.....	9
2.1.1. Différents types d'aérogénérateurs.....	10
2.1.2. Loi fondamentale régissent la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz)	15
2.1.3. Modélisation du vent	18
2.1.4. Détermination du couple aérodynamique.....	21
2.1.5. Modélisation de la transmission mécanique.....	23
2.1.6. Simulation de l'éolienne.....	25
2.2. Étude du panneau photovoltaïque.....	31
2.2.1. Différents types de modules solaires.....	31
2.2.2. Composition du module photovoltaïque	33
2.2.3. Effet photovoltaïque	34
2.2.4. Modélisation du rayonnement solaire.....	35
2.2.5. Schéma de fonctionnement et mise en équation.....	38
2.2.6. Simulation du module photovoltaïque.....	40
2.3. Conclusion	45
3. Chapitre 3 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	46
3.1. Description.....	47
3.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone.....	50
3.3. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	50
3.4. Simulation et validation expérimentale	62

3.5. Conclusion	69
4. Chapitre 4 Conversion de puissance et stratégie de commande	70
4.1. Conversion de puissance.....	70
4.1.1. Les Onduleurs.....	72
4.2. Stratégie de commande	77
4.2.1. Stratégie de commande de l'éolienne.....	77
4.2.2. Stratégie de commande du panneau photovoltaïque	81
4.2.3. Stratégie de commande de la GSAP.....	82
4.2.4. Stratégie de commande du convertisseur de puissance	87
4.3. Conclusion	90
5. Chapitre 5 Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge.....	91
5.1. Modélisation de l'aérogénérateur avec la commande vectorielle, MLI et pitch angle Control.....	92
5.2. Le Jumelage	94
5.3. Simulation.....	98
5.4. Conclusion	99
6. Conclusion générale	100
<i>Bibliographie</i>	102

Liste des Figures

<i>Figure 1-1 Consommation mondiale d'énergie depuis 1970 (étude 2008)</i>	2
<i>Figure 1-2 Production mondiale d'énergie depuis 2010 (étude 2017)</i>	3
<i>Figure 1-3 Modèle de jumelage éolienne/Diesel</i>	5
<i>Figure 1-4 Modèle de jumelage éolienne/Photovoltaïque [30]</i>	5
<i>Figure 1-5 Synoptique de la méthodologie suivie</i>	8
<i>Figure 2-1 Modèle de conversion au niveau d'un aérogénérateur</i>	9
<i>Figure 2-2 Eolienne à axe vertical et à axe horizontal</i>	10
<i>Figure 2-3 Principe de la traînée différentielle</i>	11
<i>Figure 2-4 Principe de l'incidence variable [1]</i>	11
<i>Figure 2-5 Configuration à axe horizontal</i>	13
<i>Figure 2-6 Différents éléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal [2]</i>	13
<i>Figure 2-7 Les composants de l'aérogénérateur [2]</i>	13
<i>Figure 2-8 Tube de courant à travers une éolienne</i>	15
<i>Figure 2-9 Courbe Caractéristique du coefficient de puissance [14]</i>	17
<i>Figure 2-10 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [4]</i>	18
<i>Figure 2-11 Wind Maps [27]</i>	18
<i>Figure 2-12 Modélisation de la transmission mécanique de l'éolienne [4]</i>	23
<i>Figure 2-13 Distribution de la probabilité de Weibull</i>	26
<i>Figure 2-14 Modélisation de la vitesse du vent</i>	27
<i>Figure 2-15 Modélisation du coefficient de puissance</i>	27
<i>Figure 2-16 Modélisation de la puissance en fonction du temps</i>	28
<i>Figure 2-17 Modélisation de la puissance en fonction de la vitesse du vent</i>	29
<i>Figure 2-18 Modélisation du couple en fonction du temps</i>	29
<i>Figure 2-19 Modélisation du couple en fonction de la vitesse du vent</i>	30
<i>Figure 2-20 Synoptique du module photovoltaïque</i>	31

<i>Figure 2-21 Différents types de cellules photovoltaïques [7]</i>	32
<i>Figure 2-22 Composition d'un module photovoltaïque</i>	33
<i>Figure 2-23 Effet photovoltaïque [8]</i>	35
<i>Figure 2-24 Luxmètre</i>	36
<i>Figure 2-25 Aperçu du rayonnement extraterrestre et rayonnement direct annuel</i>	37
<i>Figure 2-26 Schéma électrique d'un module photovoltaïque [7]</i>	38
<i>Figure 2-27 Modèle entrée/sortie d'un générateur PV [5]</i>	39
<i>Figure 2-28 Modélisation de l'ensoleillement durant le mois de Décembre (a) à -9°; (b) à -25°</i>	41
<i>Figure 2-29 Modélisation de l'ensoleillement durant le mois de Juin (a) à 12°; (b) à 25°</i>	42
<i>Figure 2-30 Evolution des courants en fonction de la tension</i>	43
<i>Figure 2-31 Evolution de la puissance en fonction de la tension</i>	44
<i>Figure 2-32 Evolution des courants en fonction du temps</i>	44
<i>Figure 2-33 Evolution de la puissance en fonction du temps</i>	45
<i>Figure 3-1 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface [11]</i>	47
<i>Figure 3-2 Machines synchrones à aimants permanents insérés [11]</i>	48
<i>Figure 3-3 Machines synchrones à aimants permanents chapeautés [11]</i>	49
<i>Figure 3-4 Machines synchrones à aimants permanents enterrés [11]</i>	49
<i>Figure 3-5 Représentation du passage de l'axe (a, b, c) à l'axe (d, q)</i>	52
<i>Figure 3-6 Circuit équivalent dans le repère d, q</i>	54
<i>Figure 3-7 Génératrice synchrone à aimant permanent avec une charge</i>	57
<i>Figure 3-8 Synoptique du dispositif expérimental</i>	63
<i>Figure 3-9 Montage effectué au laboratoire</i>	63
<i>Figure 3-10 Synoptique de la génératrice montée sur une charge</i>	64
<i>Figure 3-11 Schéma block du filtre SOGI-FLL</i>	65
<i>Figure 3-12 Evolution de la vitesse de rotation de la GSAP lors des essais</i>	65
<i>Figure 3-13 Entrée et sortie du signal expérimental passant par le filtre SOGI</i>	65
<i>Figure 3-14 Evolution et comparaison de la tension de sortie de la GSAP</i>	66
<i>Figure 3-15 Evolution et comparaison du courant de sortie de la GSAP</i>	67
<i>Figure 3-16 Evolution et comparaison de la tension et du courant de sortie de la GSAP</i>	68

<i>Figure 3-17 Essai d'enclenchement et de délestage successifs</i>	68
<i>Figure 4-1 Modèle de conversion au niveau de l'aérogénérateur</i>	71
<i>Figure 4-2 Modèle de conversion au niveau du panneau photovoltaïque</i>	71
<i>Figure 4-3 Modèle du redresseur</i>	73
<i>Figure 4-4 Tension de sortie du redresseur</i>	73
<i>Figure 4-5 Modèle de l'onduleur monophasé [15]</i>	74
<i>Figure 4-6 Modulation de largeur d'impulsion [15]</i>	75
<i>Figure 4-7 Topologie d'un onduleur de courant triphasé [16]</i>	76
<i>Figure 4-8 Zone de fonctionnement des éoliennes</i>	77
<i>Figure 4-9 pitch angle control basé sur la puissance</i>	78
<i>Figure 4-10 pitch angle control basé sur la vitesse de rotation</i>	79
<i>Figure 4-11 Courbe optimale de la vitesse spécifique ou TSR</i>	79
<i>Figure 4-12 Contrôle du couple optimal</i>	80
<i>Figure 4-13 Schéma de principe d'un module PV avec son convertisseur DC/DC commandé par la MPPT</i>	81
<i>Figure 4-14 Algorithme de commande de la MPPT</i>	82
<i>Figure 4-15 Classification générale de la commande de la GSAP</i>	83
<i>Figure 4-16 Schéma block de la commande vectorielle par orientation de flux</i>	83
<i>Figure 4-17 Schéma bloc de régulation du courant i_d</i>	84
<i>Figure 4-18 Schéma bloc de régulation du courant i_q</i>	86
<i>Figure 4-19 Principe de régulation de la commande MLI</i>	87
<i>Figure 4-20 Application de la commande MLI sur un onduleur</i>	88
<i>Figure 4-21 Modèle équivalent de la commande d'un onduleur</i>	90
<i>Figure 5-1 Evolution de la vitesse du vent et de l'angle d'inclinaison</i>	92
<i>Figure 5-2 Evolution de la puissance active et réactive à la sortie de la GSAP</i>	93
<i>Figure 5-3 Tension de la commande MLI</i>	93
<i>Figure 5-4 Modèle de jumelage</i>	94
<i>Figure 5-5 Structure de contrôle du mode opératoire d'un modèle relié au réseau</i>	95
<i>Figure 5-6 Structure de contrôle en mode autonome</i>	96

<i>Figure 5-7 Algorithme utilisé par le contrôleur</i>	97
<i>Figure 5-8 Evolution des puissances fournies et reçues</i>	98
<i>Figure 5-9 Evolution des puissances active et réactive à la sortie de la GSAP dans un système de jumelage</i>	99

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1-1 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables</i>	3
<i>Tableau 2-1 Fiche technique</i>	25
<i>Tableau 2-2 Caractéristique du panneau photovoltaïque</i>	40
<i>Tableau 3-1 Tableau de conversion en unité de base de la génératrice synchrone</i>	54
<i>Tableau 3-2 Paramètres de la génératrice simulée et expérimentée au Laboratoire</i>	62
<i>Tableau 4-1 Comparaison entre les méthodes de régulation de la MPPT</i>	80
<i>Tableau 5-1 Gains des correcteurs PI de la commande vectorielle</i>	92

Nomenclature

ρ	Densité de l'heure.
$P_0, P_1, P_2,$	Pression.
F_{vent}	Force du vent.
P_{mt}	Puissance théorique du vent.
P_m	Puissance récupérée du vent.
C_p	Coefficient de puissance ou Limite de Betz.
C_q	Coefficient du couple.
V_v	Vitesse du vent.
λ	Vitesse spécifique.
P	Probabilité de Weibull.
T_{am}	Couple aérodynamique.
V_{3s}	Tension triphasée statorique.
V_{3r}	Tension triphasée rotorique.
ψ_{3s}	Flux triphasé statorique.
ψ_{3r}	Flux triphasé rotorique.
L_{ss}	Inductance stator-stator.
L_{rr}	Inductance rotor-rotor.
L_{sr}	Inductance stator-rotor.
i_{3s}	Courant statorique.
i_{3r}	Courant rotorique.
M_{sf}	Inductance mutuelle de magnétisation.
H_{31}	Composante homopolaire du courant.
P_{32}	Matrice de transformation de Park.
C_{32}	Matrice de transformation de Concordia.
V_d	Tension de l'axe d.
V_q	Tension de l'axe q.
i_d	Courant de l'axe d.
i_q	Courant de l'axe q.
ψ_d	Flux de l'axe d.
ψ_q	Flux de l'axe q.

R_s	Résistance statorique.
L_d	Inductance de l'axe d.
L_q	Inductance de l'axe q.
ω_r	Vitesse de rotation.
C_{em}	Couple électromécanique.
J	Inertie.
C_r	Couple résistant à la charge.
f_v	Coefficient total de frottement visqueux.
C_{pr}	Couple principale.
C_{rel}	Couple de réluctance.
R_{ch}	Résistance de la charge.
L_{ch}	Inductance de la charge.
C_d	Correcteur PI selon l'axe d.
C_q	Correcteur PI selon l'axe q.
ξ	Coefficient d'amortissement.
T_e	Période d'échantillonnage.
T_{sw}	Période de commutation.
K_{p-id}	Gain proportionnel de l'axe d.
K_{i-id}	Gain intégrateur de l'axe d.
K_{p-iq}	Gain proportionnel de l'axe q.
K_{i-iq}	Gain intégrateur de l'axe q.

Introduction générale

La question de l'énergie fut tout le temps un problème mondial majeur. Des guerres et des conflits internationaux ont vu le jour pour s'emparer des ressources permettant de s'assurer un développement durable et un besoin comblé en terme d'énergie. Mais ayant compris que partir à la recherche de ces ressources demande de dépenser une quantité d'énergie limite égale à ce qu'ils désirent récupérer, plusieurs pays se sont tournés vers les énergies nouvelles et renouvelables, nouvelles certes, car depuis le temps des premiers Hommes où le charbon et le pétrole étaient encore inconnus, nos ancêtres ont su analyser et utiliser à bon escient les ressources naturelles telles que le vent et le soleil.

Ce chapitre d'introduction vise à cadrer l'étude et le travail effectué dans un contexte socio-économique permettant ainsi d'exposer les problématiques majeures liées au jumelage de deux sources de production d'énergie de façon générale, et celles liés à l'implantation et le jumelage de deux systèmes de production d'énergie, dont les ressources primaires ne sont aucunement contrôlables par l'Homme, à savoir les éoliennes et les panneaux photovoltaïques.

1.1.Contexte socio-économique

L'énergie électrique a été pendant très longtemps convoitée, et elle l'est aujourd'hui encore plus. De très récentes études mettent le point sur l'accroissement exponentiel de la demande comme la montre la *Figure 1-1*, d'après l'agence internationale de l'énergie entre 1970 et 2000 la demande a augmenté de 11 % et elle est estimée à 30 % d'ici 2030 selon une étude menée en 2008, et une diminution de la source à citer le pétrole, le charbon, le gaz naturel, ou bien l'énergie nucléaire qui a causé tant de tort et de pollution.

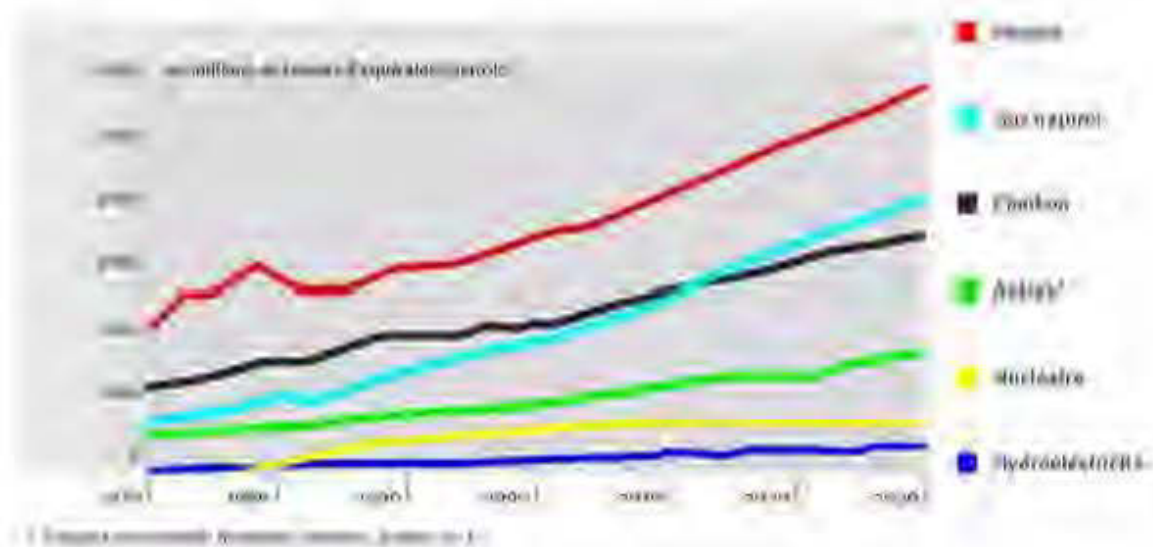


Figure 1-1 Consommation mondiale d'énergie depuis 1970 (étude 2008) [28]

De plus, le raccordement au réseau électrique est onéreux surtout pour relier la population des régions éloignées. Rajoutant à cela le protocole de Kyoto entré en vigueur le 16 février 2005 qui vise à réduire l'émission de CO₂ et par conséquent atténuer les dégâts dus au réchauffement planétaire.

« *La nécessité est mère de l'invention* » : dans cet esprit, quatre principaux axes se sont développés dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables, à savoir : l'hydraulique,

le solaire, l'éolien et la biomasse dont les avantages et inconvénients sont présentés dans le *Tableau 1-1*. Certes, les trois dernières formes restent peu productives et elles ne représentent qu'un faible pourcentage du secteur de production d'énergie électrique. Mais la recherche scientifique ne cesse d'avancer et l'agence internationale d'énergie a bon espoir et estime une augmentation remarquable vue les implantations et l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelable comme le montre la *Figure 1-2*



Figure 1-2 Production mondiale d'énergie depuis 2010 (étude 2017) [28]

Tableau 1-1 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

Technologie	Avantages	Inconvénients
Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> - Parfait pour les domiciles - Simples et rapides à installer - Nécessitent peu d'entretien - Silencieux et sans danger pour la santé - Exploitable partout 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible rendement - Coût élevé vis-à-vis de l'investissement de base - Contient des produits toxiques et leurs recyclages n'est pas d'actualité
Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie propre - Très longue durée de vie - Énergie de grande qualité et contrôlable au besoin 	<ul style="list-style-type: none"> - Peut bouleverser des écosystèmes - Coût d'installation très important

	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de stocker la source « eau » dans des barrages 	<ul style="list-style-type: none"> - Inondation de grands espaces fertiles obligeant ainsi les populations à migrer
Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite aucun carburant et ne produit aucun gaz à effet de serre - Ne nécessite pas de très grandes surfaces - Contribue au développement des communautés locales - Permet de générer de grandes puissances 	<ul style="list-style-type: none"> - Très dépendante de la localisation et de la topographie - Peut troubler l'écosystème et causer des nuisances sonores - Énergie intermittente être peut considérer à elle seule comme énergie stable
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> - Ressources naturelles en quantité abondante - L'une des énergies les plus rentables - Cout d'investissement relativement faible - Les résidus sont rapidement biodégradables 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible densité énergétique - Complexité de la valorisation de la biomasse urbaine - La surexploitation peut engendrer une déforestation - Dégage du CO2

1.2. Le jumelage

N'étant pas apte à satisfaire le besoin en énergie de façon indépendante et stable, la meilleure solution envisagée pour les éoliennes et les panneaux photovoltaïques est de les coupler soit ensemble soit à d'autres systèmes de production d'énergie. Les systèmes de jumelages les plus répondus se font avec des générateurs Diesel, *Figure 1-3*, ceci permet de procurer plus de stabilité au système et d'augmenter le rendement global. L'autre solution est de coupler les deux systèmes ensemble (*Figure 1-4*) pour pouvoir profiter des ressources d'énergie en même temps (le vent et le soleil).

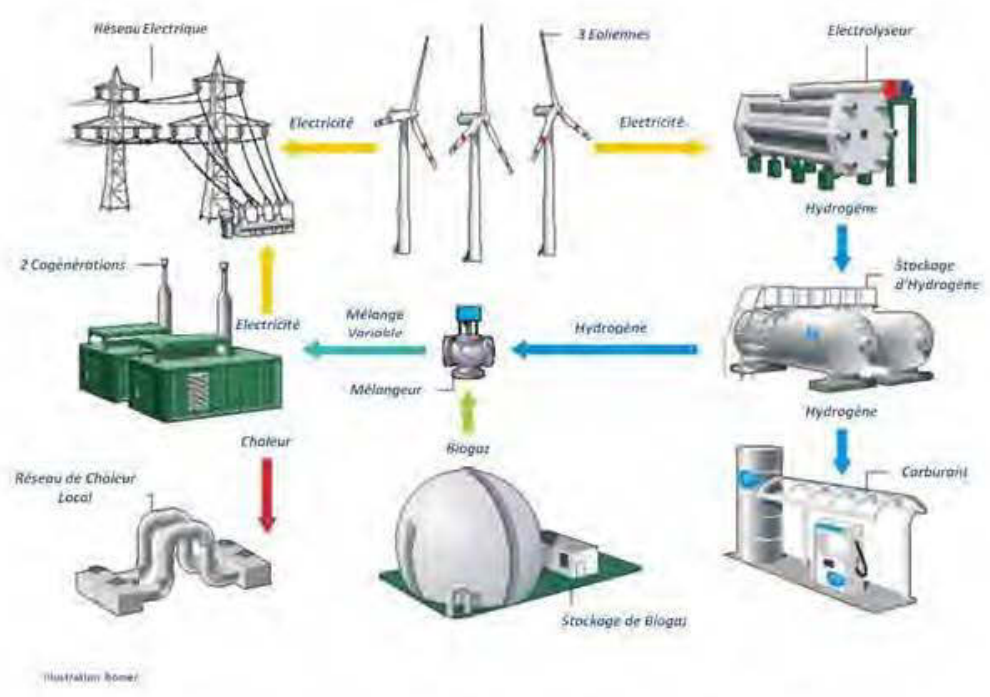


Figure 1-3 Modèle de jumelage éolienne/Diesel [4]

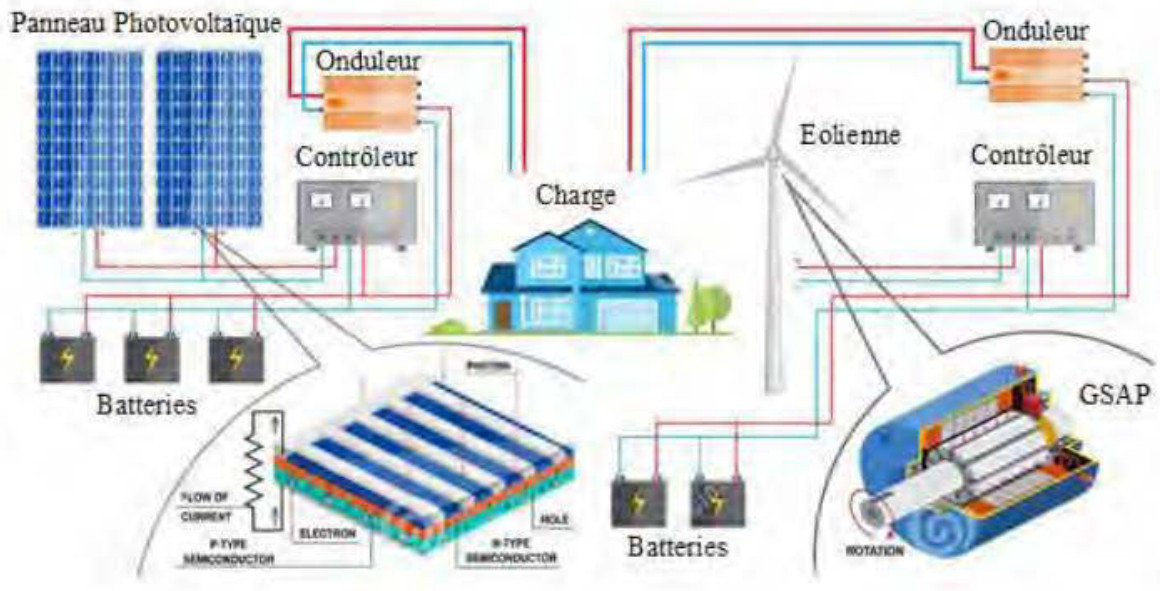


Figure 1-4 Modèle de jumelage éolienne/Photovoltaïque [30]

1.3. Problématique

D'innombrables systèmes de jumelage ont été développés et proposés sur le marché ces dernières années, certains systèmes ont pu prouver leurs efficacités, mais cela ne leur a pas permis de faire du coude à coude avec les géants classiques de la production d'énergie à savoir le nucléaire ou le pétrole, ceci est dû soit au cout élevé soit au rendement faible des systèmes proposés.

Pour les installations éoliennes ou photovoltaïques, plusieurs paramètres incontrôlables entrent en jeux et c'est en grande partie qui fait la difficulté de l'étude et de la modélisation d'une implantation de ressources d'énergie renouvelable sur un site donné. La prédiction des paramètres météorologiques est plus difficile pour le vent vu le caractère imprédictible de son évolution en comparaison avec l'ensoleillement qui est défini par une série d'équations bien étudiées et largement développées. Pour cette raison, la plupart des études d'implantation se basent sur les données recueillies par les centres météorologiques au cours des années.

Même en résolvant cette partie du problème, il reste à étudier le comportement de l'éolienne et du panneau photovoltaïque dans les conditions les plus réalistes de fonctionnement. Pour l'aérogénérateur, le choix se porte sur une éolienne entraîne une génératrice synchrone à aimants permanents due à son aspect plus pratique en comparaison de ses congénères d'une part pour les moindres couts en maintenance et d'une autre part pour la facilité d'implantation de la commande en comparaison de la génératrice asynchrone. Il existe divers modèles pour la simulation de la génératrice synchrone, mais ils ne prédissent pas parfaitement l'état de fonctionnement de celle-ci ; d'où l'idée de chercher un modèle qui se base uniquement sur les paramètres de la machine et de la charge qui lui est reliée. Un tel modèle permet d'aider à la conception de la machine sans pour autant avoir à effectuer plusieurs essais.

La dégradation des équipements au cours du temps influence significativement la production d'énergie d'où la nécessité de pouvoir identifier les paramètres de la machine afin d'adapter la commande et d'effectuer les maintenances nécessaires en temps voulu.

Un dernier point et pas des moindres, un tel système ne peut être implémenté sans penser à y relier un système de stockage que ça soit par batteries ou autres et donc ceci rend la tâche plus difficile du côté du dispatch entre les divers équipements du système global.

1.4. Méthodologie

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier, modéliser et simuler un système de jumelage composé d'une éolienne et d'un panneau photovoltaïque et développer une commande intelligente pour commander le système entier.

Pour atteindre cet objectif, nous procédons comme suit :

- Faire une revue de la littérature sur les modèles déjà développés et utilisés pour la modélisation des éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les génératrices synchrones à aimants permanents.
- Développer les modèles de base pour simuler les aspects aérodynamique et mécanique de l'éolienne.
- Développer un modèle numérique et un modèle analytique permettant de modéliser la génératrice synchrone à aimants permanents et dont nous pouvons sortir un modèle simplifié d'identification des paramètres.
- Modéliser le panneau photovoltaïque en passant par la modélisation de l'ensoleillement pour une région donnée, la modélisation du panneau se fait d'une part sous l'effet de la variation de la température sous un ensoleillement constant et par la suite sous une température journalière constante avec l'effet de la variation de l'ensoleillement au cours d'une journée.
- Finir par regrouper les divers systèmes sous le contrôle d'une commande permettant de stabiliser la production de la microcentrale.

La *Figure 1-5* donne une idée sur la topologie du système et les étapes suivies.

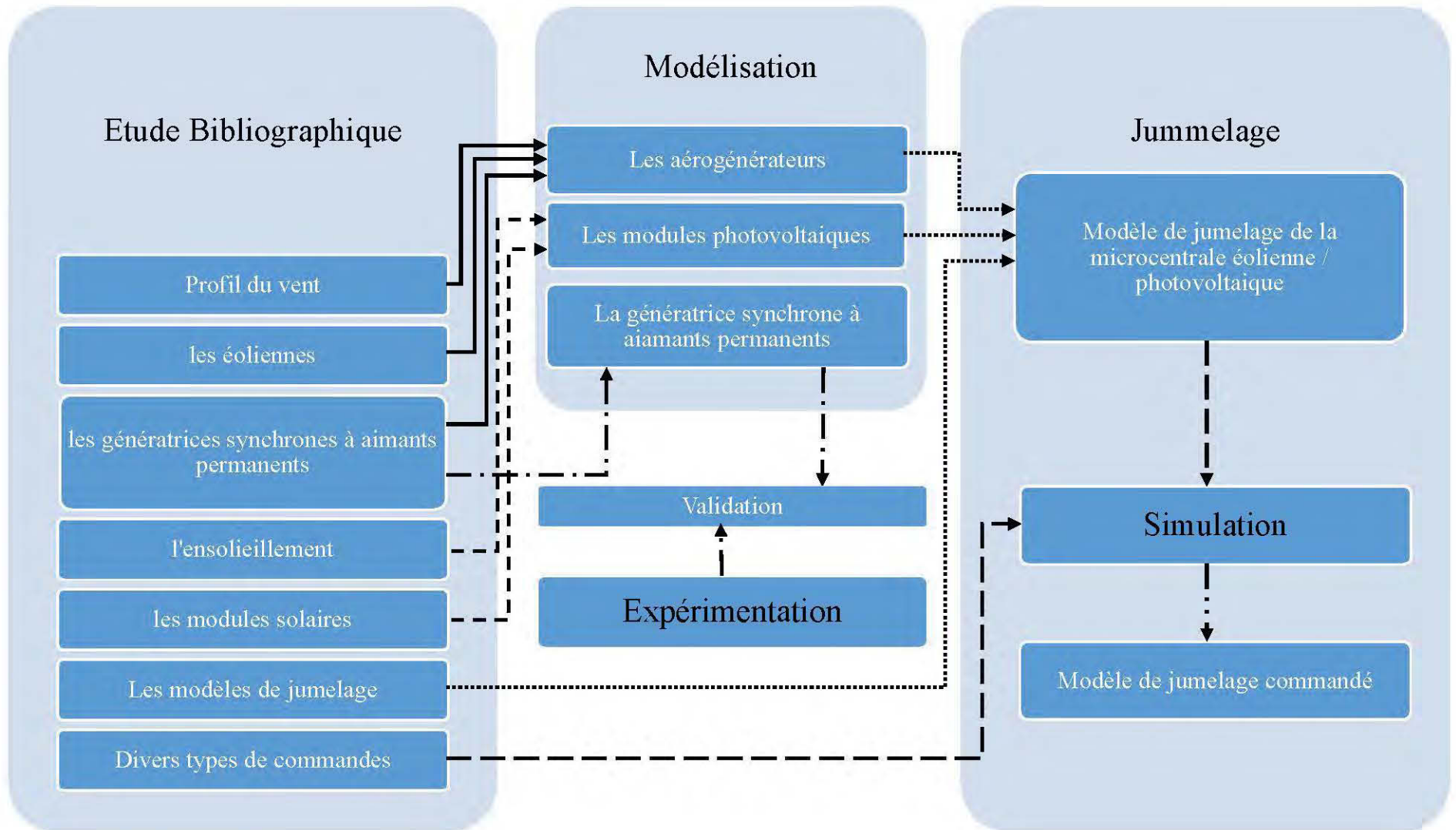


Figure 1-5 Synoptique de la méthodologie suivie

Chapitre 2

Étude et Modélisation de l'éolienne et du panneau photovoltaïque

2.1. Modélisation des aérogénérateurs

Un aérogénérateur est une éolienne munie d'un générateur produisant de l'énergie électrique. Le procédé consiste à convertir la puissance récupérée du vent (énergie cinétique) selon les lois de l'aérodynamique en une transmission mécanique qui à son tour est convertie en couple pour produire l'énergie électrique au niveau de la génératrice.

La Figure 2-1 présente de façon simplifiée le processus de production de l'énergie électrique à partir de la cinétique du vent via un aérogénérateur.



Figure 2-1 Modèle de conversion au niveau d'un aérogénérateur

2.1.1. Différents types d'aérogénérateurs

Nous distinguons notamment deux grandes familles d'aérogénérateurs, celles à axes verticaux et celles à axes horizontaux. *Figure 2-2 (a)* et *Figure 2-2 (b)*

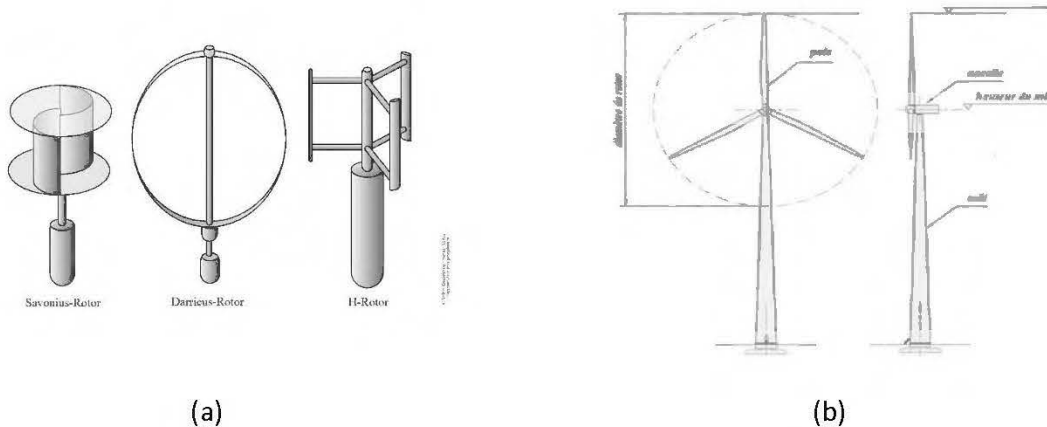


Figure 2-2 Éolienne à axe vertical et à axe horizontal

2.1.1.1. Éolienne à axe vertical

Il existe deux principes de fonctionnement pour ce type d'éoliennes, la traînée différentielle et la variation cyclique d'incidence.

- La traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machines tel qu'il est schématisé dans la *Figure 2-3* est identique à celui d'un anémomètre : l'éolienne est munie de deux pâles de formes creuses, sur lesquelles des efforts d'intensités différentes et de sens opposés sont exercés par le vent. Il en résulte donc un couple moteur qui fait tourner le rotor de l'éolienne [1].

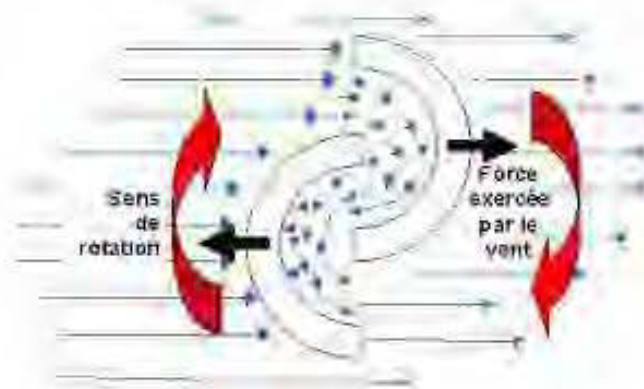


Figure 2-3 Principe de la traînée différentielle

- La variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables *Figure 2-4*.

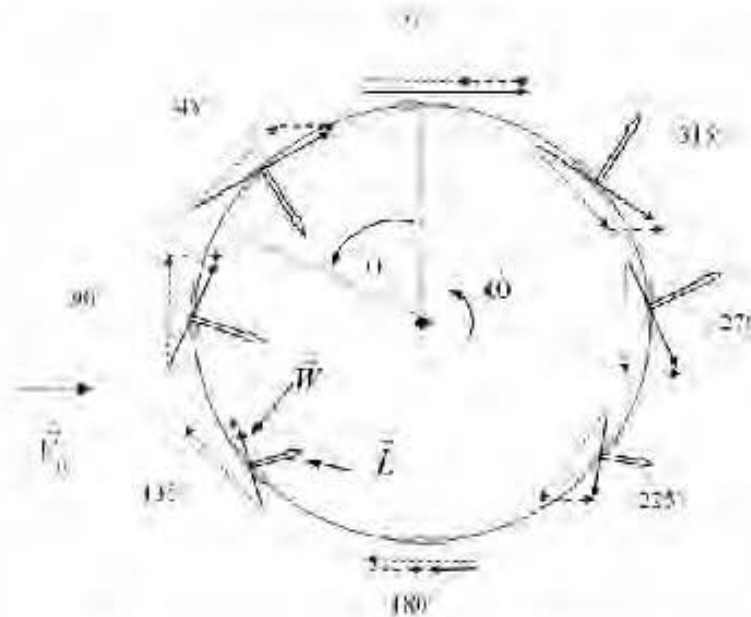


Figure 2-4 Principe de l'incidence variable [1]

\vec{V}_0 : Vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne.

ω : Vitesse angulaire de rotation des pales.

La combinaison de ces forces génère un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Cependant, le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de démarrage s'avère donc nécessaire [1].

Vis-à-vis des éoliennes à axe horizontal, celles à axes verticaux ne nécessitent pas l'édification d'une tour, et encore, ces machines produisent l'électricité quel que soit le sens du vent et ainsi se passer du dispositif d'orientation de la machine. Néanmoins, le fait d'être installé à faible hauteur du sol est l'une des raisons principales de leurs faibles efficacités [1].

2.1.1.2. *Éolienne à axe horizontal*

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Elles présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « amont », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposée au vent, et inversement, les éoliennes « aval » comme on peut le voir sur la *Figure 2-5* [1].

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour.

L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». Enfin, une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » [1].

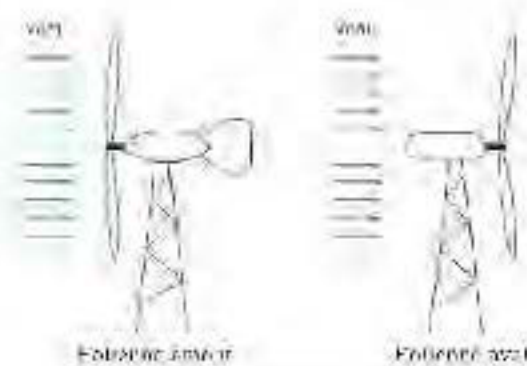


Figure 2-5 Configuration à axe horizontal

Les figures présentées ci-dessus donnent une vue globale sur la composition de l'aérogénérateur à axe horizontal (générateur éolien). Figure 2-6 & Figure 2-7.



Figure 2-6 Différents éléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal [2]



Figure 2-7 Les composants de l'aérogénérateur [2]

- 1- **Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Elles sont en fibres de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes.
- 2- **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- 3- **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.
- 4- **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- 5- **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- 6- **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- 7- **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente, mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- 8- **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- 9- **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- 10- **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- 11- **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

Et finalement, on a au pied du mât un transformateur [2].

2.1.2. Loi fondamentale régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz)

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la *Figure 2-8*, sur lequel nous avons représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit V .

Loin en amont et en aval de l'éolienne, la pression de l'air reste égale à la pression atmosphérique P_0 . Une variation de pression est considérée tout proche des pales de l'éolienne. Pour $z = -\varepsilon$ nous avons une pression égale à P_1 et pour $z = +\varepsilon$ nous avons une pression égale à P_2 .

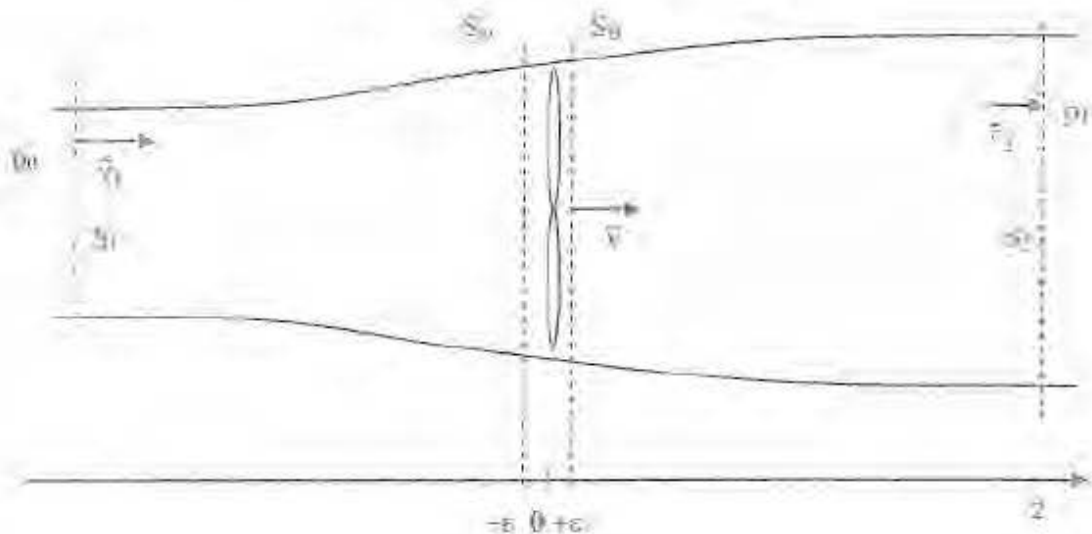


Figure 2-8 Tube de courant à travers une éolienne

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est donnée par l'équation (1) :

$$m = \rho \cdot S \cdot v \quad (1)$$

$$v = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (2)$$

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (3)$$

Pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et pour un effet du champ de pesanteur nul, on applique le théorème de Bernoulli.

En amont nous avons
$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (4)$$

En aval nous avons
$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (5)$$

La soustraction de (4) - (5) donne :

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

La force exercée par le vent sur la surface S (surface balayée par le rotor) est donnée par l'équation (7) :

$$F = m \cdot (V_1 - V_2) \quad (7)$$

$$F = (P_1 - P_2) \cdot S = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot S \quad (8)$$

La puissance est donnée par :
$$P_m = F \cdot v \quad (9)$$

Finalement, nous avons :
$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (10)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance théorique P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1^3)}{2} \quad (11)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} = C_p \quad (12)$$

C_p est appelée limite de Betz. Elle est obtenue par le traçage de la courbe $r = f(x)$

Avec $x = \frac{V_2}{V_1}$ (13) ; $r = C_p = \frac{P_m}{P_{mt}}$ (14)

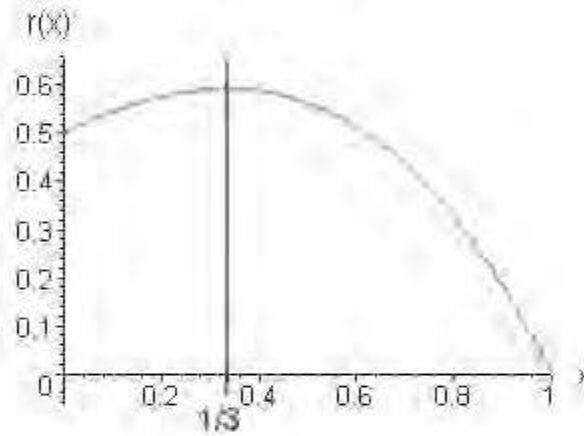


Figure 2-9 Courbe Caractéristique du coefficient de puissance [14]

Le maximum est obtenu $x = 1/3$ pour la valeur $r(x) = 16/27 = 0.59$

En y rajoutant les pertes thermiques, les thermiciens assurent qu'au se référant au cycle de Carnot le maximum récupérable est de 0.5 d'où nous avons :

$$P_m = 0.5 P_{mt} \quad (15)$$

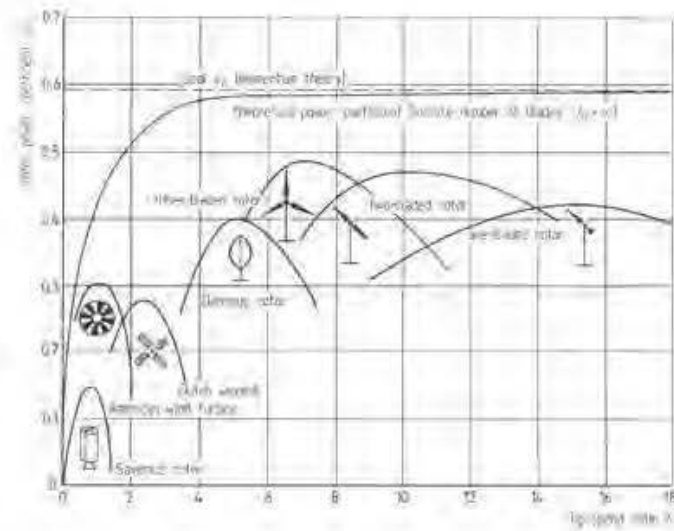


Figure 2-10 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [4]

La Figure 2-9 démontre l'allure du coefficient de puissance pour une éolienne tripale. Cette allure peut changer selon le type de l'éolienne utilisée, cela est démontré, dans la Figure 2-10.

2.1.3. Modélisation du vent

2.1.3.1. Généralité

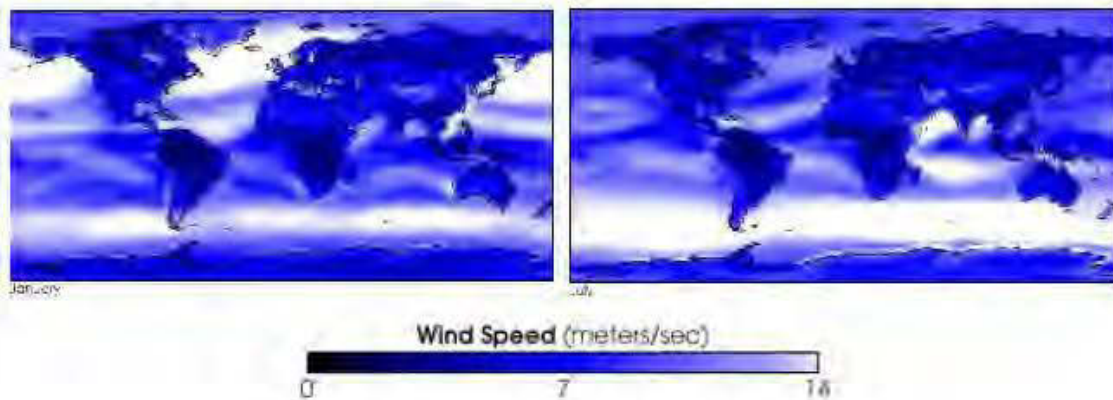


Figure 2-11 Cartographie du vent [27]

Le vent est l'une des forces de la nature et c'est aussi l'une des sources d'énergies renouvelables qui ont été utilisées par l'Homme à travers les siècles pour divers usages à noter le moulin à vent, la navigation à voile, le séchage, etc.

Aujourd'hui même, le vent est exploité pour son grand potentiel par l'un des axes de production d'énergies renouvelables à savoir l'énergie éolienne.

Le vent est une masse d'air en mouvement dont le déplacement est dû à la différence de température entre l'équateur et les pôles qui provoquent à son tour une différence de pression dans l'atmosphère rajoutant à cela la rotation de la planète, le type de terrain et les effets locaux.

Le vent peut être décrit de 3 façons différentes :

La première consiste à utiliser les lois de la dynamique des fluides et les équations primitives atmosphériques, la deuxième méthode présage de considérer une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, et finalement d'utiliser la statistique de Weibull.

2.1.3.2. Modélisation

Pour des raisons de complexité de couplages des équations d'aérodynamiques et de mécanique des fluides avec celles du système électrique, il sera plus simple de considérer des modélisations représentatives du vent, à savoir la probabilité (statistique de Weibull) et la décomposition en série de Fourier.

- Décomposition en série de Fourier

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation suivante [3] :

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (16)$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : amplitude de l'harmonique de l'ordre k

ω_k : pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

- Statistique de Weibull

Un moyen commun pour décrire la vitesse du vent est l'utilisation de la distribution de Weibull, donnée par l'équation suivante :

$$P(V_v, C_v, K_v) = \frac{K_v}{C_v^{K_v}} V_v^{K_v-1} \cdot e^{-\left(\frac{V_v}{C_v}\right)^{K_v}} \quad (17)$$

V_v est la vitesse du vent. (C_v, k_v) un couple de paramètres déterminés par analyse de l'histogramme des classes de vent.

Le facteur de forme k_v est supérieur à 3 si la forme de l'histogramme ressemble à celle d'une distribution normale, caractérisée par une répartition uniforme autour d'une valeur moyenne [4].

C_v est un facteur d'échelle généralement supérieur à 5.

Pour générer une suite numérique respectant la distribution de Weibull. On se sert de l'expression où $\text{rand}(t)$ est une fonction génératrice de nombres aléatoires compris entre 0 et 1, suivant une distribution uniforme. En rajoutant la valeur moyenne v_v , de la vitesse du vent, et la moyenne ξ_v^0 des perturbations, l'expression permet de générer le profil du vent sur période de temps voulu [4].

$$\xi_v(t) = \left(-\frac{\ln(\text{rand}(t))}{C_v} \right)^{\frac{1}{K_v}} \quad (18)$$

$$V_v = (1 + \xi_v - \xi_v^0) \cdot v_v \quad (19)$$

La détermination de la vitesse moyenne du vent se fait par l'équation

$$\frac{v_v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (20)$$

Sachant que α dépend de la nature du terrain dans lequel l'installation sera plantée. Avec :

$\alpha = 0.16$ pour les terrains plats ou les plans d'eau

$\alpha = 0.28$ pour les terrains boisés et les banlieues ou villages

$\alpha = 0.4$ pour les centres urbains

Une autre méthode consiste à établir un algorithme probabiliste permettant de générer un profil aléatoire de vitesse de vent proposée par « *A. Pigazo & Al.* » [5].

« *I.G. Damousis, & Al* » proposent une méthode basée sur la logique floue. Ce modèle flou TSK est développé pour effectuer la prévision de la vitesse du vent et de la puissance électrique jusqu'à 2 h en avance. Le modèle est formé à l'aide d'un algorithme d'apprentissage basé sur l'intelligence artificielle. Les données du modèle sont des données éoliennes recueillies dans des stations météorologiques voisines d'un rayon allant jusqu'à 30 km. La méthode proposée offre une amélioration significative par rapport à la méthode persistante pour un terrain plat, car la performance de celle-ci est réduite dans les cas où le terrain est complexe [6].

2.1.4. Détermination du couple aérodynamique

La détermination du coefficient de puissance C_p nous permettra par la suite de déterminer le couple aérodynamique.

Nous avons :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} \quad \& \quad C_p = C_p(\lambda) \quad (21)$$

λ est la vitesse spécifique exprimée par la relation suivante

$$\lambda = \frac{U}{v_v} = \frac{R \cdot \omega_{mr}}{v_v} \quad (22)$$

R est le rayon du rotor et ω_{mr} est la vitesse du rotor dans la partie mécanique

Précédemment, nous avons démontré l'expression de la puissance récupérée dont l'expression est donnée par

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_v^3 \quad (23)$$

Celle-ci peut aussi se mettre sous la forme :

$$P_m = \omega_{mr} \cdot T_{am} \quad (24)$$

T_{am} Représente le couple aérodynamique.

Nous définissons aussi le coefficient du couple donné par la relation :

$$C_q(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (25)$$

D'où on obtient l'expression du couple aérodynamique :

$$T_{am} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_q(\lambda) \cdot v_v^2 \quad (26)$$

2.1.5 Modélisation de la transmission mécanique

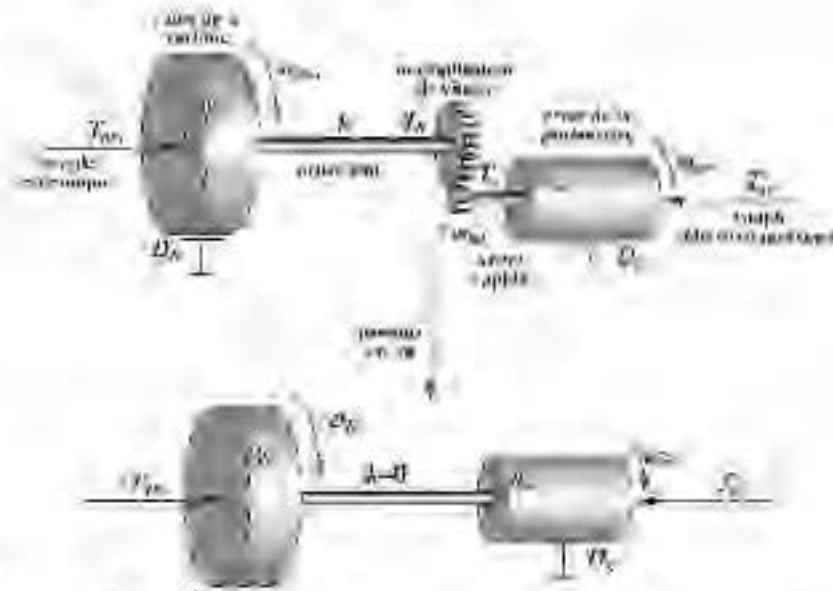


Figure 2-12 Modélisation de la transmission mécanique de l'éolienne [4]

Pour modéliser la transmission mécanique, nous employons généralement le modèle à deux masses tournantes, reliées par un couplage flexible à travers un multiplicateur de vitesse comme présenté dans la Figure 2-12 [4].

Les frictions côté rotor sont représentées par un coefficient de frottement rotorique \bar{D}_r et les frictions du côté générateur sont représentées par \bar{D}_g . Ce système mécanique est soumis aux actions opposées du couple mécanique rotorique et du couple électromagnétique du générateur [4].

Le multiplicateur de vitesse sert à adapter la vitesse lente du rotor à vitesse rapide nécessaire pour le bon fonctionnement du générateur. Au niveau du multiplicateur [4], nous avons :

$$\omega_g = \eta_{gb} n_{gb} \omega_r \quad (27)$$

$$P_g = T_g \omega_g = \eta_{gb} T_r \omega_r = P_r \eta_{gb} \quad (28)$$

$$T_r = \frac{n_{gb}}{\eta_{gb}} T_g \quad (29)$$

Avec

ω_{gm} : Vitesse mécanique de la génératrice

η_{gb} : Rendement du multiplicateur de vitesse

n_{gb} : Rapport de multiplication de vitesse

ω_{mr} : Vitesse mécanique du rotor de l'éolienne

P_{ge} : Puissance de la génératrice

T_{ξ} : Couple arbre rapide

T_a : Couple arbre lent

n_{gb} et η_{gb} sont respectivement le rapport de multiplication et le rendement du multiplicateur de vitesse. En général, nous avons $\eta_{gb} = 1$ et nous admettons une transmission intégrale de la puissance au niveau de boîte de vitesse. Si les deux arbres sont reportés à la même base de puissance (transformation pu), le multiplicateur de vitesse peut être supprimé du modèle [4].

En choisissant S_N (la puissance nominale de la génératrice) comme référence de base de puissance, on obtient les équations :

$$P_{gref} = S_N = P_{mref} \quad (30)$$

$$\omega_{gref} = n_{gb} \cdot \omega_{mref} \quad (31)$$

$$T_{mref} = n_{gb} \cdot T_{gref} \quad (32)$$

$$\text{En mode pu nous avons aussi : } (\omega_{gm})_{pu} = (\omega_{mr})_{pu} \ \& \ (T_{\xi})_{pu} = (T_a)_{pu} \quad (33)$$

L'équation dynamique de la partie tournante en mode pu est donnée par l'expression

$$2H_T \cdot \frac{d\omega_R}{dt} = T_{am} - T_{ge} - D_T \cdot \omega_R \quad (34)$$

$$\text{Avec} \quad \omega_R(s) = \frac{T_{am}(s) - T_{ge}(s)}{D_T + 2sH_T} = \frac{K_T}{1 + sT_T} T_{am}(s) - T_{ge}(s) \quad (35)$$

$$\text{Et} \quad K_T = \frac{1}{D_T} \ \& \ T_T = \frac{2H_T}{D_T} \quad (36)$$

2.1.6. Simulation de l'éolienne

2.1.5.1. Caractéristique de l'éolienne

Pour la simulation de l'aérogénérateur nous avons choisi de travailler sur le modèle Enercon E-82, déjà installé à Martigny et dont le tableau suivant présente les caractéristiques de l'éolienne (Fiche technique).

Tableau 2-1 Fiche technique

Fiche technique « Enercon E-82 »

<i>Puissance nominale</i>	2 MVA
<i>Diamètre du rotor</i>	82 m
<i>Hauteur du moyeu</i>	78 m
<i>Nombre de pales</i>	3
<i>surface balayée</i>	5280 m ²
<i>Vitesse de rotation</i>	6 — 17,5 tr/min
<i>Vitesse d'enclenchement</i>	2,5 m/s
<i>Vitesse de déclenchement</i>	25 m/s
<i>Vitesse nominale</i>	12 m/s

2.1.5.2. Simulation

Dans cette partie, nous présentons les simulations réalisées pour l'éolienne. La *Figure 2-13* montre la distribution de la probabilité de Weibull sur un site donné. Nous pouvons constater que la probabilité la plus élevée est pour des vitesses de vent compris entre 8 et 12 m/s, ceci nous permet de valider que le site choisit est bien un site adapté à une implantation d'un aérogénérateur en vue de production d'énergie.

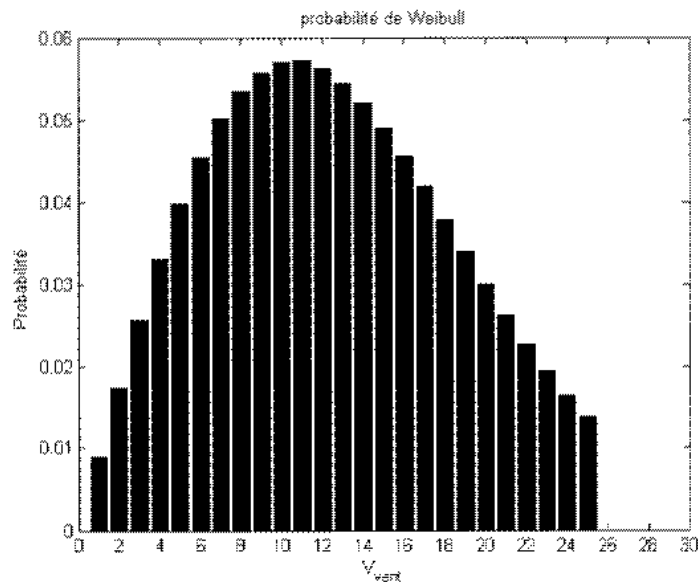


Figure 2-13 Distribution de la probabilité de Weibull

Sachant la complexité relative à la modélisation d'un profil de vent nous avons opté dans ce travail de définir la vitesse du vent comme un signal sinusoïdal incluant des perturbations gaussiennes, le profil, présenté à la *Figure 2-14*, a été généré pour modéliser une possible évolution au cours de 24 heures avec une vitesse moyenne de 4,2 m/s.

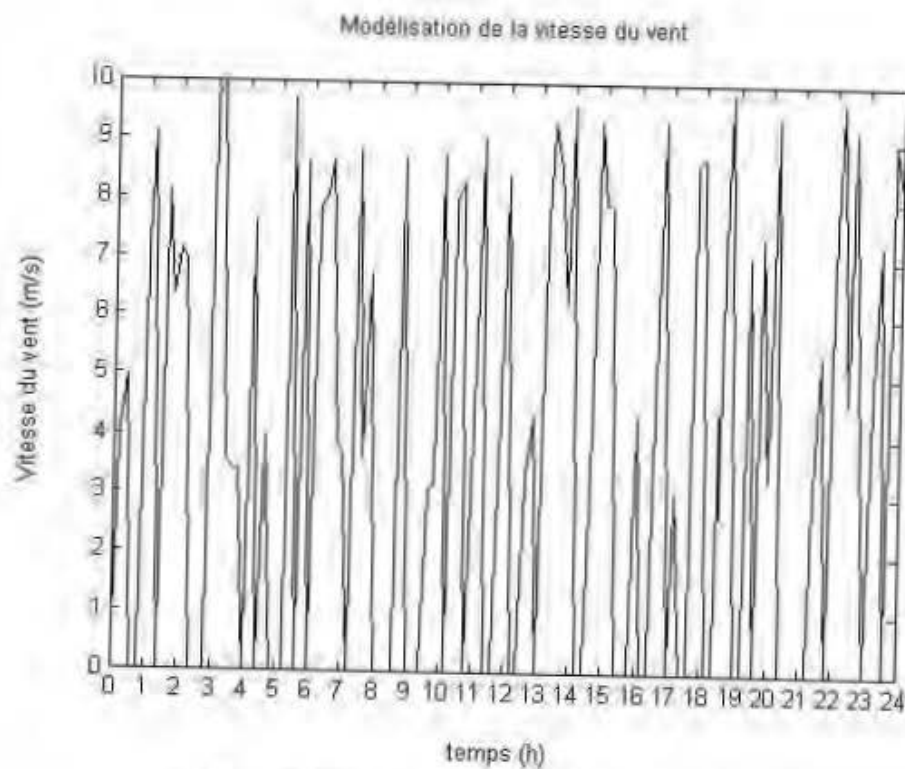


Figure 2-14 Modélisation de la vitesse du vent

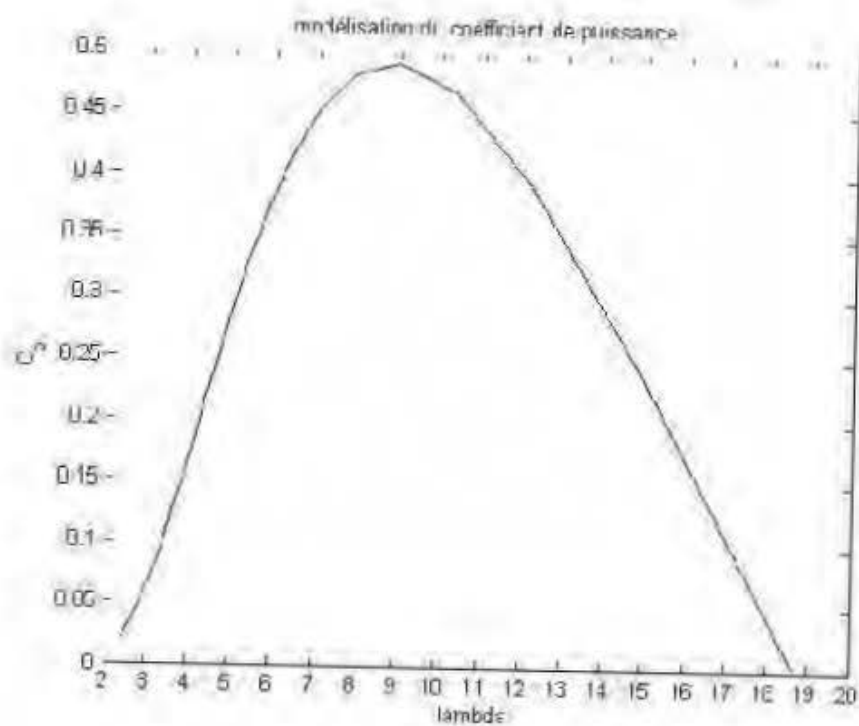


Figure 2-15 Modélisation du coefficient de puissance

La *Figure 2-15* présente l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ . Nous remarquons que la valeur de C_p décroît au-delà de la valeur de λ correspondante à la valeur de la vitesse nominale de l'éolienne. Ceci montre l'importance des contrôleurs et commandes qui doivent être implantés dans la machine et qui seront développés plus loin dans ce travail.

Les *Figures 2-16 et 2-18* représentent respectivement l'évolution de la puissance et celle du couple sur une durée de 24 heures pour le profil de vent généré et présenté à la *Figure 2-15*.

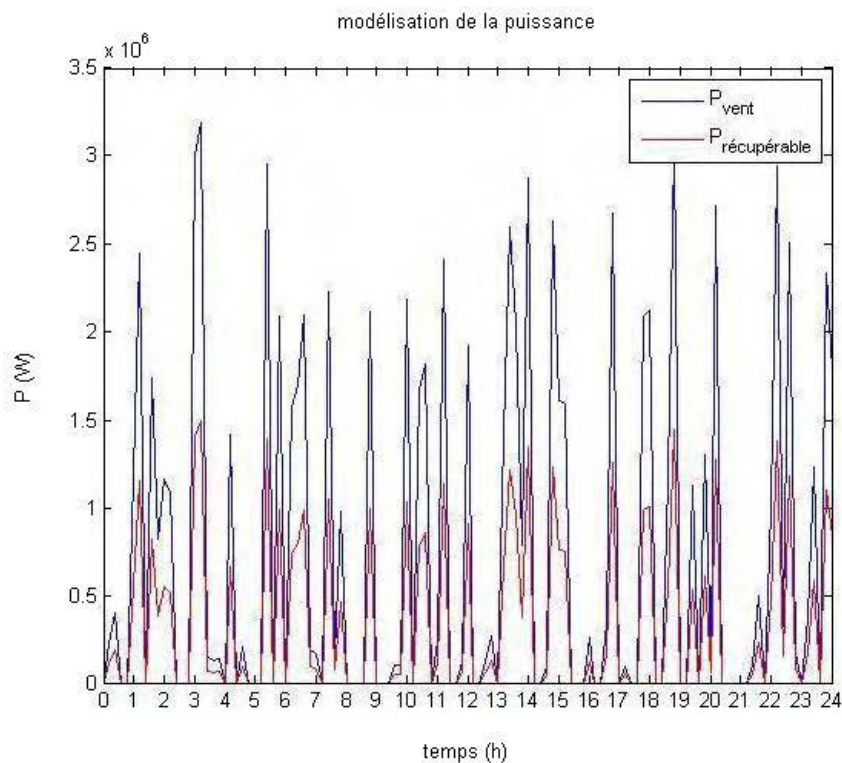


Figure 2-16 Modélisation de la puissance en fonction du temps

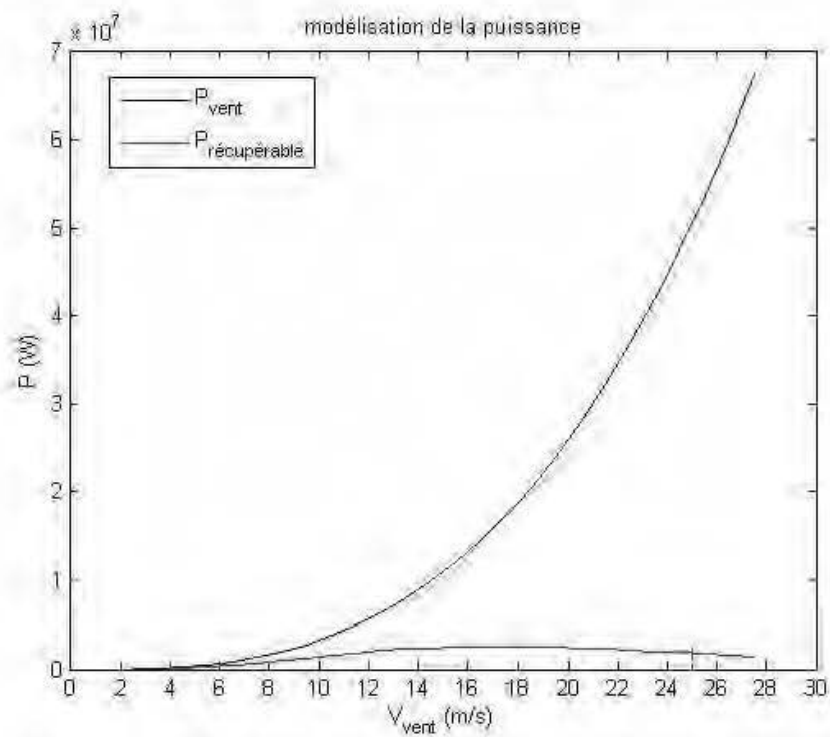


Figure 2-17 Modélisation de la puissance en fonction de la vitesse du vent

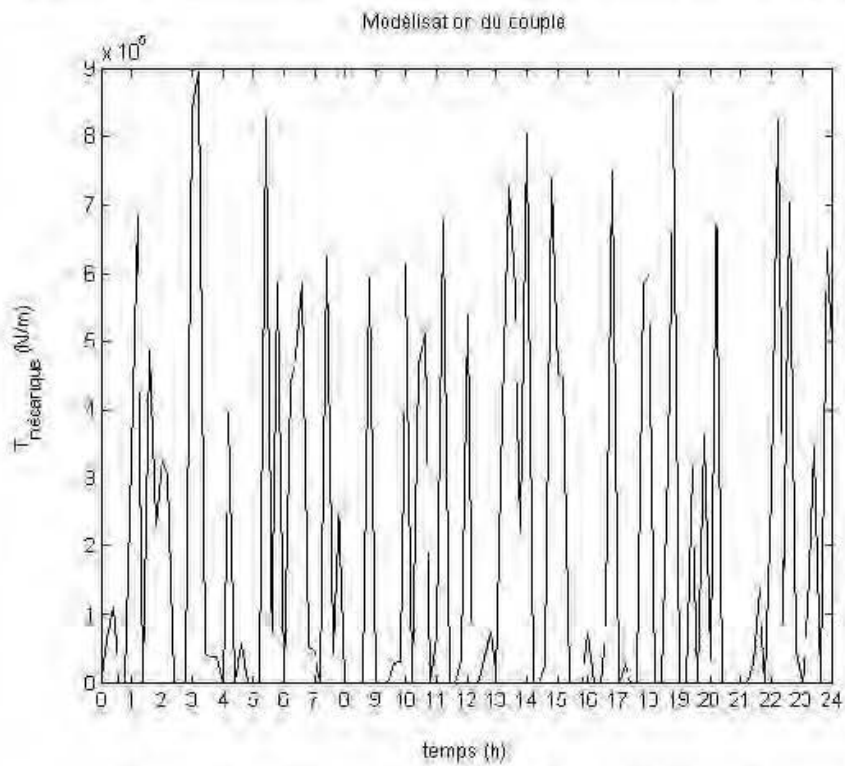


Figure 2-18 Modélisation du couple en fonction du temps

Les Figures 2-17 et 2-19 représentent respectivement l'évolution de la puissance et celle du couple en fonction de l'évolution de la vitesse du vent. L'évolution de ces deux grandeurs confirme de nouveau l'importance de la commande afin de maintenir un point optimal de fonctionnement. Nous remarquons une faible déclinaison au niveau de la puissance, mais une importante au niveau du couple délivré par l'arbre de transmission, moins de couple transmis engendre moins de vitesse de rotation et par conséquent une plus faible puissance développée par la génératrice synchrone.

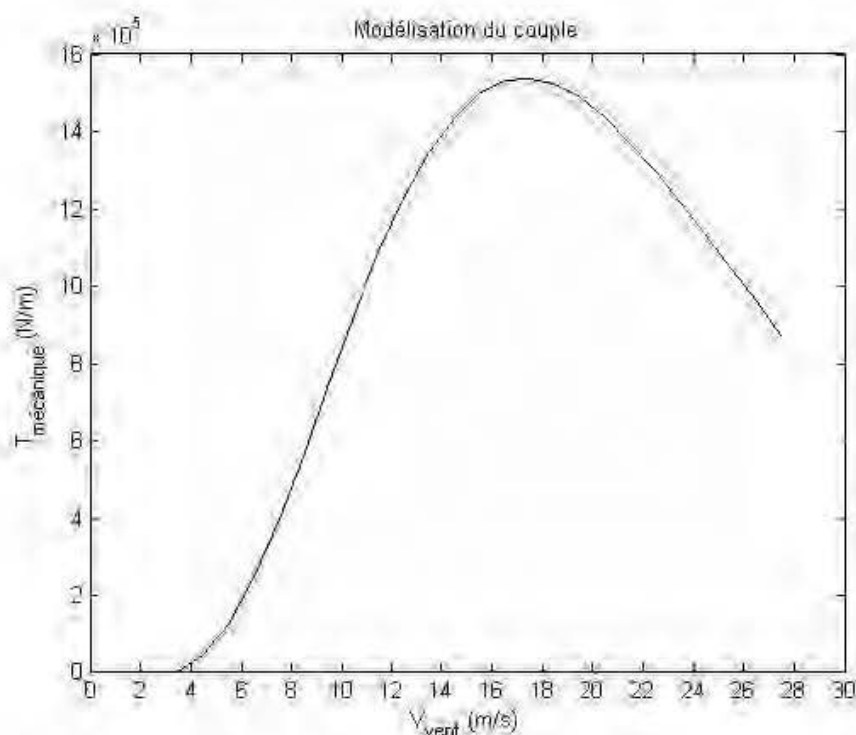


Figure 2-19 Modélisation du couple en fonction de la vitesse du vent

2.2. Étude du panneau photovoltaïque

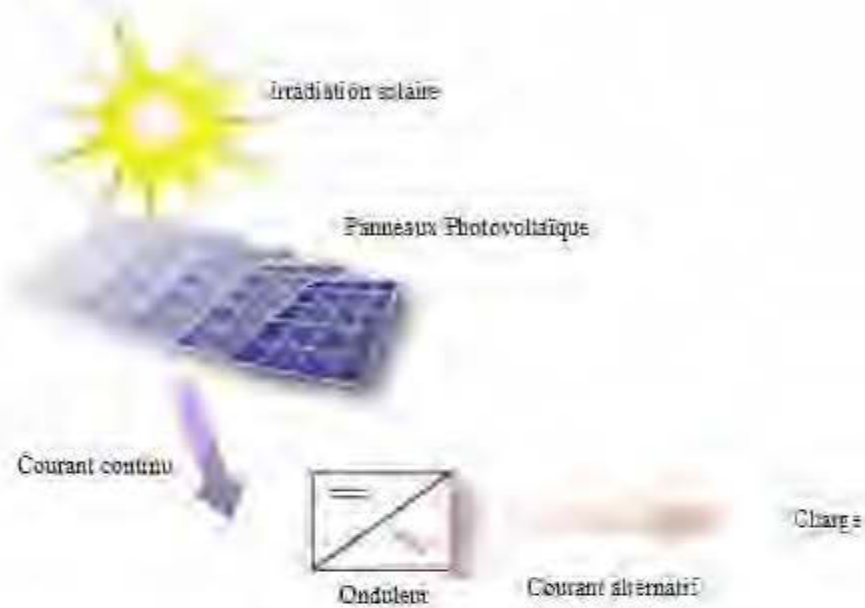


Figure 2-20 Synoptique du module photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont des modules composés de cristaux de silicium qui convertissent l'énergie solaire, l'énergie des photons contenus dans les rayons solaires pour être plus précis, en énergie électrique.

La *Figure 2-20* présente le synoptique de la conversion de la radiation solaire en énergie électrique de manière simplifiée

2.2.1. Différents types de modules solaires

Depuis les premiers prototypes, les chercheurs n'ont pas cessé de concevoir de nouvelles technologies et nous distinguons 3 catégories de compositions de modules photovoltaïques :

- Module à cellules monocristallines
- Module à cellules poly cristallines
- Module à cellules à couches minces



Figure 2-21 Différents types de cellules photovoltaïques [7]

- **Cellule solaire monocristalline**

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 μm d'épaisseur, appelées galettes. Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arête de 152 mm. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion [7].

Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules polycristallines [7].

- **Cellule solaire poly cristalline**

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires poly cristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires poly cristallines [7].

Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 μm d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car

le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires poly cristallines présentent un rendement entre 13 et 16 % [7].

- Cellule solaire à couche mince

Le groupe des cellules à couche mince compte les cellules amorphes au silicium et les cellules formées à partir d'autres matériaux, comme le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ou l'arséniure de gallium (GaAs). Dans la pratique, les cellules en silicium sont les plus utilisées [7].

Pour les cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2 μm . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est pas nécessaire.

Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 % [7].

2.2.2. Composition du module photovoltaïque

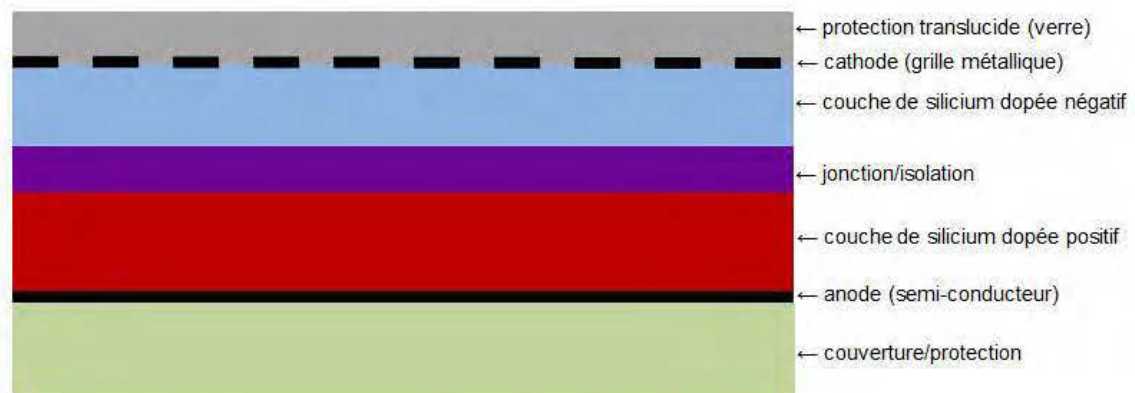


Figure 2-22 Composition d'un module photovoltaïque

La *Figure 2-22* nous montre les différents composants d'un module solaire et qui sont détaillés comme suit.

- 1- **La protection translucide** : elle permet de protéger les cellules qui ne peuvent pas être exposées directement à la lumière, il faut donc un matériau le plus transparent et le plus solide possible : le verre.
- 2- **Le conducteur qui sert de cathode** : une grille métallique
- 3- **La couche dopée négativement** : (dite aussi dopée N), dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à celle du matériau intrinsèque d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.
- 4- **Une couche de jonction** qui sert d'isolation entre les deux couches (N et P), sans elle il y aurait des transferts d'électrons entre les deux couches et donc il n'y aurait pas d'électricité produite, car ces transferts se feraient sans passer par les câbles.
- 5- **La couche dopée positivement** : (dite aussi dopée P), cette couche possède donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à celle du matériau intrinsèque, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P)
- 6- **Le semi-conducteur** qui sert d'anode
- 7- **La couverture** qui sert de protection

2.2.3. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium) [8].

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leurs énergies aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique [8].

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement, il se crée donc entre elles un champ électrique [8].

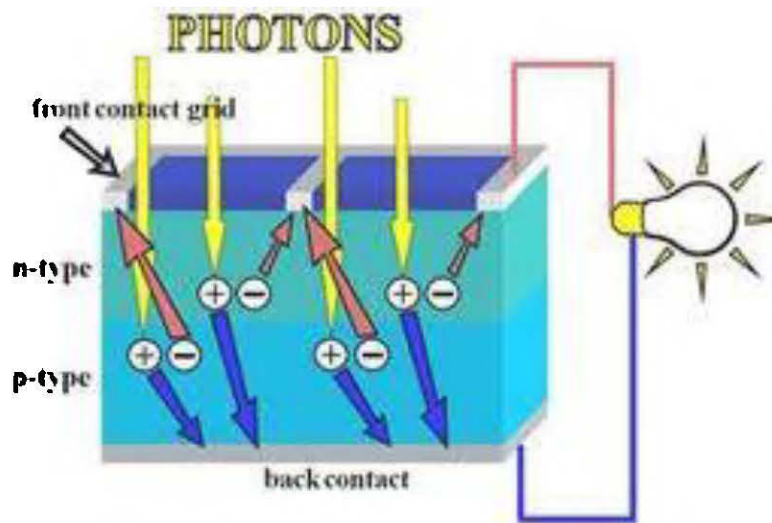


Figure 2-23 Effet photovoltaïque [8]

2.2.4. Modélisation du rayonnement solaire

Un pas fondamental pour la détermination de la performance d'un panneau photovoltaïque est la détermination du rayonnement incident sur le plan du panneau en fonction du temps [9].

Celui-ci est noté E_T et il est donné par :

$$E_T = E_b + E_g + E_d \quad (37)$$

Où

E_b : Le rayonnement direct vers le panneau.

E_g : Le rayonnement réfléchi par la surface de la Terre.

E_d : Le rayonnement diffus.

Les trois types de rayonnement sont donnés par les équations (38) (39) et (41) :

$$E_d = DNI \times \cos(AOI) \quad (38)$$

$$E_g = GHI \times albedo \times \frac{(1 - \cos(\theta_{r,surf}))}{2} \quad (39)$$

Avec

- *DNI* : (Direct normal irradiance) Éclairement normal direct, déterminé en utilisant un radiomètre à cavité absolue ou tout simplement un luxmètre donné par la Figure 2-24.



Figure 2-24 Luxmètre

AOI : (Angle of Incidence) Angle d'incidence donné par l'équation (40)

$$AOI = \cos^{-1}(\cos(\theta_z) \times \cos(\theta_r) + \sin(\theta_z) \times \sin(\theta_r) \cos(\theta_A - \theta_{A,panneau})) \quad (40)$$

Où θ_z , θ_A , θ_r , et $\theta_{A,panneau}$ sont respectivement les angles solaires de l'azimut et du zénith et les angles d'inclinaison et de l'azimut du panneau.

GHI : (Global horizontal irradiance) Éclairement horizontal global.

albedo : Des valeurs sont données dans le tableau dans l'annexe chapitre

$\theta_{r,surf}$: Angle d'inclinaison du panneau par rapport au sol.

Pour ce qui est du rayonnement diffus, plusieurs modèles de calcul ont été adoptés, à savoir le modèle de Hottel et Woertz, le modèle de Klucher, le modèle de Reindl et finalement le modèle utilisé dans ce travail le modèle de Hay-Davis.

$$E_d = DHI \times \left[A_2 \times \cos(AOI) + (1 - A_2) \frac{1 + \cos(\theta_r)}{2} \right] \quad (41)$$

DHI : (Diffuse horizontal irradiance) représente l'éclairement horizontal diffus, il est obtenu en calculons la différence entre l'éclairement horizontal global et l'éclairement normal direct multiplié par le cos de l'azimut comme le montre l'équation (42).

$$DHI = GHI - DNI \times \cos(\theta_z) \quad (42)$$

$$A_2 = \frac{DNI}{E_a} \quad (43)$$

E_a : Le rayonnement extraterrestre. La courbe de sa variation annuelle est donnée par la *Figure 2-25*.

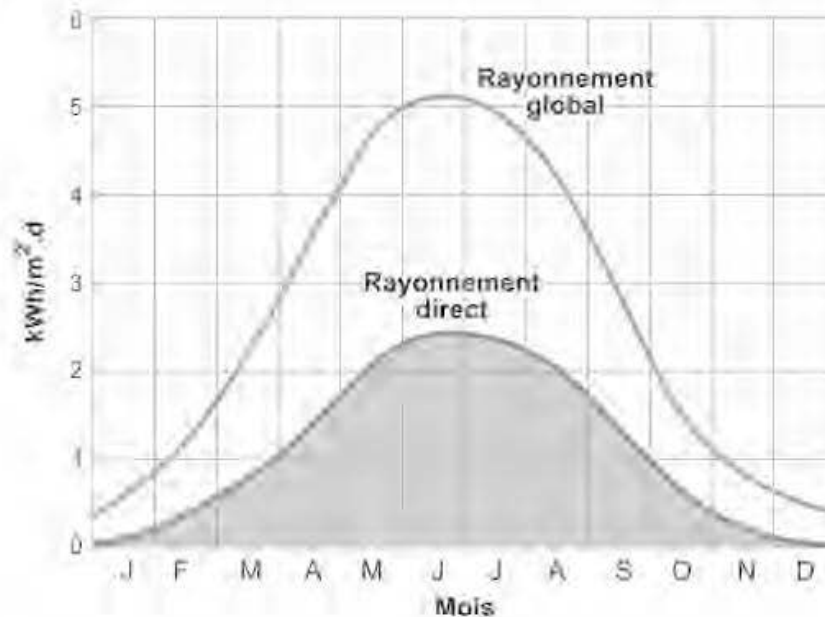


Figure 2-25 Aperçu du rayonnement extraterrestre et rayonnement direct annuel [29]

2.2.5. Schéma de fonctionnement et mise en équation

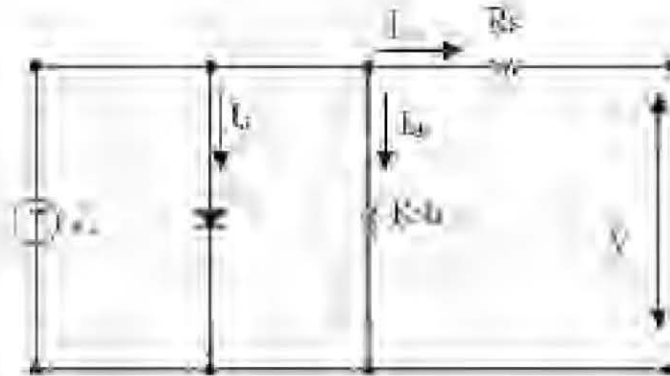


Figure 2-26 Schéma électrique d'un module photovoltaïque [7]

En appliquant la loi des nœuds, le courant électrique I s'exprime par la relation suivante :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (44)$$

Où I_p est le photo-courant exprimé par la relation

$$I_p = P_1 E_s [1 + P_2 (E_s - E_{r,s}) + P_3 (T_s - T_{r,s})] \quad (45)$$

I_d est le courant circulant dans la diode, exprimé par

$$I_d = I_{s0} \left(\exp \left(\frac{e_0 (V + RI)}{An_s K T_s} \right) - 1 \right) \quad (46)$$

$$I_{s0} = P_4 T_s^3 \exp \left(\frac{-E_g}{K T_s} \right) \quad (47)$$

I_{sh} Le courant passant par la résistance shunt, exprimé par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (48)$$

$$T_s = T_a + \frac{P_s}{800} (TUC - 20) \quad (49)$$

Finalement, nous avons :

$$I = P_1 R_s [1 + P_2 (E_i - E_{ref}) + P_3 (T_i - T_{ref})] - P_4 T_i^2 \exp\left(\frac{-E_g}{k T_i}\right) \left(\exp\left(\frac{q_0 (V + R_s I)}{A n_s k T_i}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_w} \quad (30)$$

P_1, P_2, P_3, P_4 des paramètres définis par le constructeur et présentés dans le *Tableau 2-2*.

Nous prouvons ainsi la dépendance du courant et de la tension de la température et de l'ensoleillement. Aussi le système est représenté par la *Figure 2-27*.



Figure 2-27 Modèle entrée/sortie d'un générateur PV [5]

Par ailleurs
$$P = UI \quad (31)$$

D'où l'influence de la température et de l'ensoleillement sur le courant débité et la tension produite influence par conséquent la puissance obtenue d'un panneau photovoltaïque.

2.2.6. Simulation du module photovoltaïque

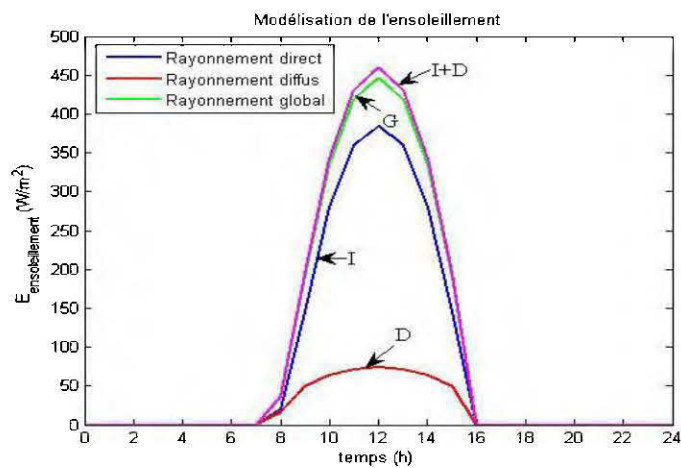
2.3.6.1. Caractéristique

Tableau 2-2 Caractéristique du panneau photovoltaïque

P1	0,0036	Constante
P2	0,0001	Constante
P3	-0,0005	Constante
P4	70,874	Constante
Rsh	151,16(Ω)	résistance shunte
Rs	0,614(Ω)	Résistance en série
Tref	25($^{\circ}$ C)	température de référence
Eref	1000(W/m ²)	ensoleillement de référence
Eg	1,12(eV)	Énergie de gap pour une cellule de silicium
ns	36	nombre de cellules en série
k	1,38 ^E -23(J/K)	constante de Boltzmann
Ta	-10 à 40 $^{\circ}$ C	température ambiante
TUC	45($^{\circ}$ C)	Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule (donnée par le constructeur)
e0	1,6 ^E -19 C	la charge d'un électron

2.3.6.2. Simulation

Pour pouvoir simuler correctement un module photovoltaïque, il est nécessaire de modéliser l'ensoleillement selon la région dans laquelle nous envisageons d'implémenter les modules. La Figure 2-28 représente l'évolution au cours de 24 heures durant le mois de Décembre. Nous remarquons une variation considérable au niveau de l'ensoleillement reçu au niveau du panneau, cela est dû à la variation de température et les simulations démontrent bien le rôle de cette dernière dans la production photovoltaïque.



(a)

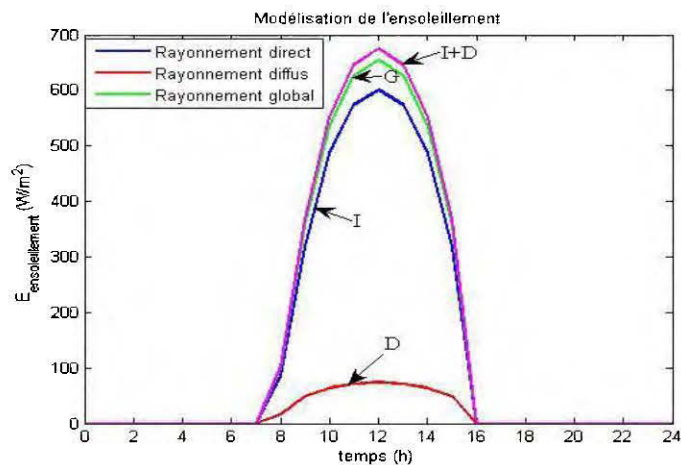
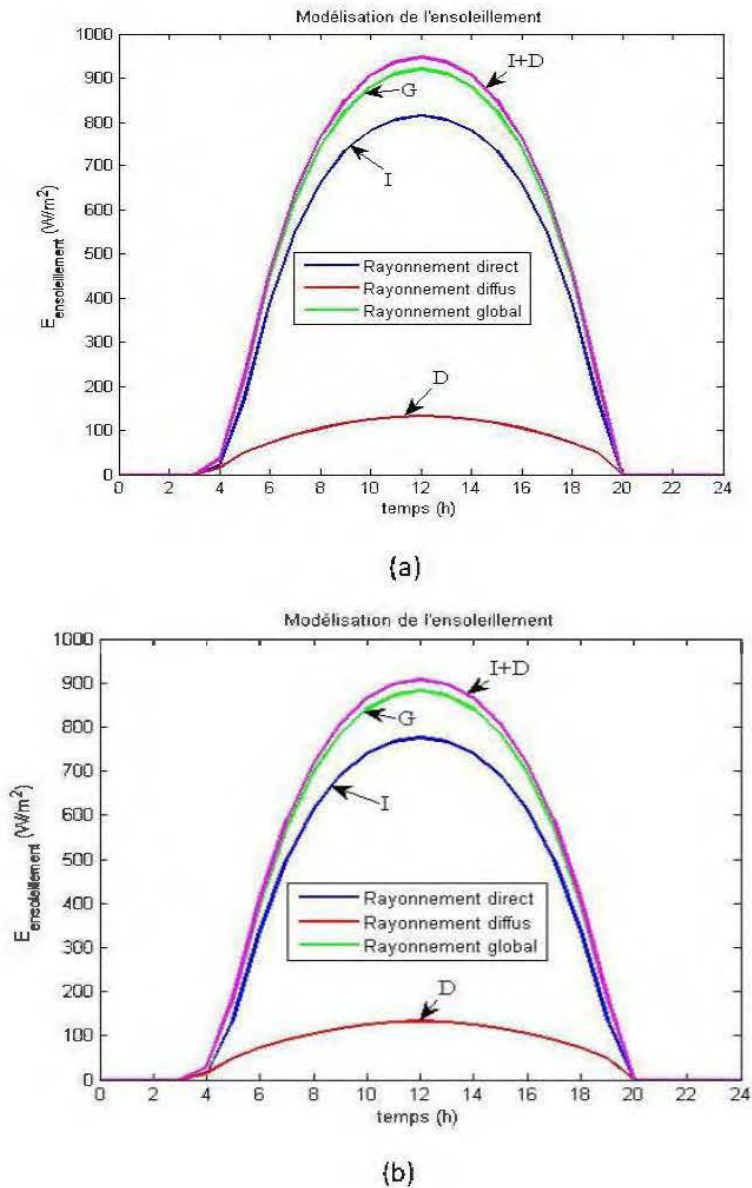


Figure 2-28 Modélisation de l'ensoleillement
durant le mois de Décembre (a) à -9° ; (b) à -25°

Contrairement aux simulations précédentes au cours du mois de juin l'enseillement ne varie pas énormément en fonction de la température et la différence est presque indétectable comme nous pouvons le voir sur la *Figure 2-29*.



*Figure 2-29 Modélisation de l'enseillement
durant le mois de Juin (a) à 12° ; (b) à 25°*

Les *Figures 2-30 et 2-31* représentent respectivement l'évolution des courants et de la puissance à la sortie d'un module photovoltaïque. Ces simulations sont effectuées pour un ensoleillement constant de 600 W/m^2 en considérant une variation de la température. Nous remarquons que la puissance est relativement un peu plus grande quand nous tendons vers des températures plus élevées. Généralement, il est préférable de garder le panneau sous un fonctionnement en température optimale de 25° .

Par la suite, les *Figures 2-32 et 2-33* représentent aussi l'évolution des courants et de la puissance à la sortie d'un module photovoltaïque, mais pour une température constante et un ensoleillement variable simulé précédemment sur la *Figure 2-30 (b)*.

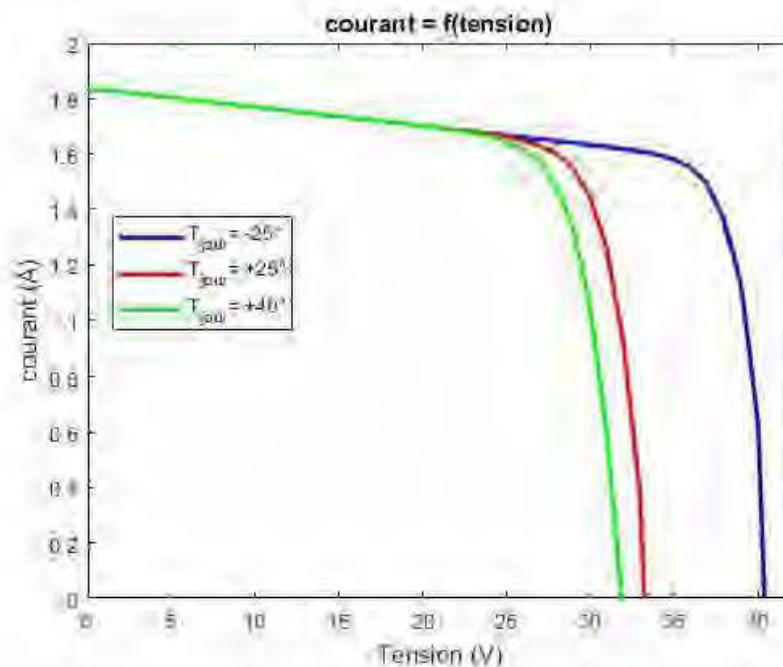


Figure 2-30 Evolution des courants en fonction de la tension

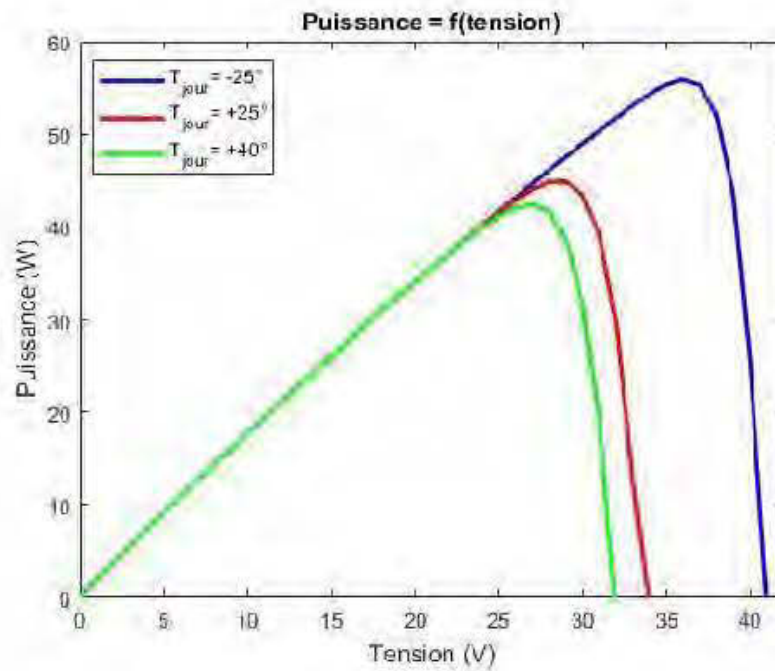


Figure 2-31 Evolution de la puissance en fonction de la tension

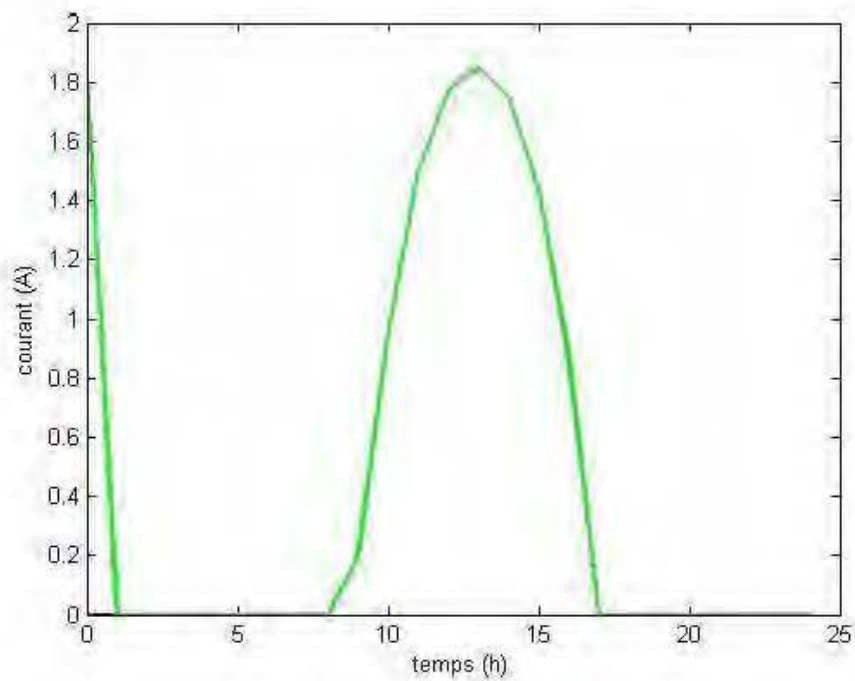


Figure 2-32 Evolution des courants en fonction du temps

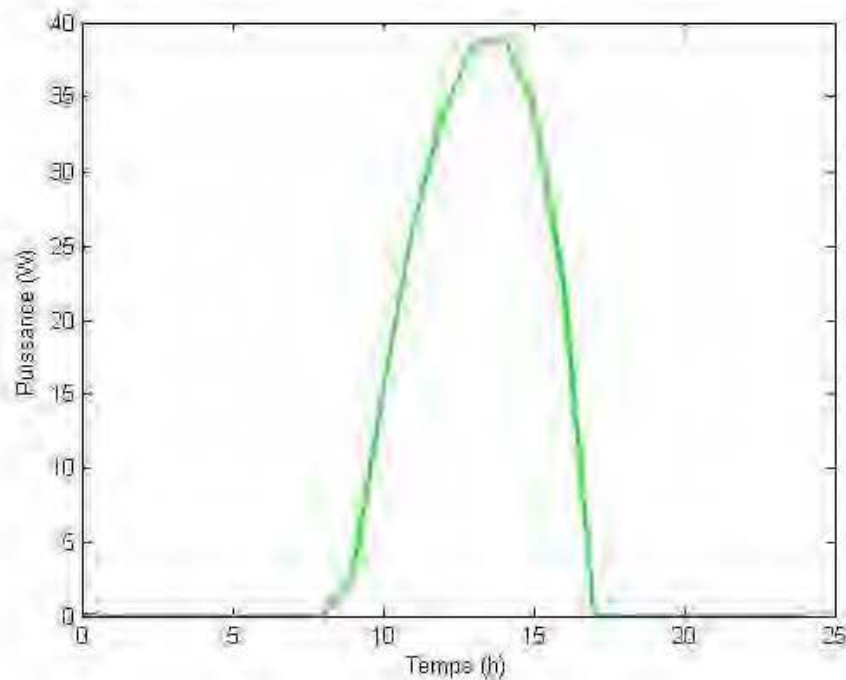


Figure 2-33 Evolution de la puissance en fonction du temps

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les différents systèmes qui porteront sur le jumelage dans ce qui suit du rapport.

Nous avons mis en évidence l'intervention des paramètres météorologique ainsi que géographique (emplacement des éoliennes et des panneaux photovoltaïques) et le rôle important qu'ils jouent dans le processus de production d'énergie.

Nous avons aussi décortiqué les phénomènes entrant en jeux dans le cycle de conversion de la source primaire à la source finale qui n'est autre que l'électricité

Chapitre 3

Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW [10].

Dans notre projet, nous allons utiliser une machine synchrone à aimants permanents. Donc dans ce chapitre nous introduirons la notion de GSAP (génératrice synchrone à aimants permanents) ainsi que les modèles d'équations qui seront utilisés plus tard pour la simulation du système de la génératrice.

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants permanents [11].

Le progrès technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a également conduit vers un progrès important dans les performances globales des entraînements à vitesse variable, ce qui facilite l'autopilotage de la machine synchrone la rendant ainsi très performante comparée la machine asynchrone et celle à courant continu [12].

Mais l'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système [11].

3.1. Description

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou induit se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à $2p$ pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $\frac{2\pi}{3}$ et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur comporte p pôles Nord et p pôles Sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Le rotor est soit à pôles saillants ou à pôles lisses [11]

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue mécanique :

- ✓ **Génératrices synchrones à aimants permanents montés en surface (GSAPS)**

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor, voir *Figure 3-1*. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses. La tenue mécanique des aimants est facilitée par la force centrifuge [11]



Figure 3-1 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface [11]

✦ **Génératrices synchrones à aimants permanents insérés (GSAPD)**

À partir de la structure précédente, nous entaillons des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique voir *Figure 3-2*. Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces interpolaire qui ajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la GSAPS [11].



Figure 3-2 Machines synchrones à aimants permanents insérés [11]

✦ **Génératrices synchrones à aimants permanents chapeautés (GSAPC)**

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. Nous plaçons sur les aimants des pièces polaires généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.e.m. au stator en agissant sur le profil de la pièce [11].



Figure 3-3 Machines synchrones à aimants permanents chapeautés [11]

✓ Générateurs synchrones à aimants permanents enterrés (GSAPE)

Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents voir Figure 3-4. En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer [11].



Figure 3-4 Machines synchrones à aimants permanents enterrés [11]

3.2.Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.e. m induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur [11].

3.3.Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

3-3.1 Définition des matrices

Toutes les matrices étant utilisées dans la mise en équation de la GSAP sont développées dans l'annexe du chapitre 3.

3-3.2 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [12,13] :

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases.
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- L'effet de peau et de la température est négligé.

3-3.3 Mise en équation

3-3.3.1 Modélisation dans le repère (a, b, c)

Le modèle abc des équations électriques de la machine est défini par :

$$[V_{3s}] = [R_s][i_{3s}] + d \frac{[\psi_{3s}]}{dt} \quad (52)$$

$$[V_{3r}] = [R_r][i_{3r}] + d \frac{[\psi_{3r}]}{dt} \quad (53)$$

Or nous avons :

$$[\psi_{3s}] = [L_{ss}][i_{3s}] + [M_{sr}][i_{3r}] \quad (54)$$

$$[\psi_{3r}] = [L_{rr}][i_{3r}] + [M_{rs}][i_{3s}] \quad (55)$$

Nous notons

$$i_{3r} = i_f$$

$$[\psi_{3s}] = [L_{ss}][i_{3s}] + [M_{sr}] \cdot i_f \quad (56)$$

$$[L_{ss}] = [L_{sv}] + [L_{so}] \quad (57)$$

$$[\psi_{3s}] = \left\{ L_{cs} \cdot [C_{32}][C_{32}]^T + L_{so} \cdot [H_{31}][H_{31}]^T + \frac{3}{2} L_{sv} \cdot [P_{32}(\xi)] \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} [P_{32}(\xi)]^T \right\} \cdot [i_{3s}] \\ + \sqrt{\frac{3}{2}} [P_{32}] \cdot \begin{bmatrix} M_{sf} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i_f \quad (58)$$

i_f : Représente le courant de magnétisation.

M_{sf} : Représente l'inductance mutuelle de magnétisation.

H_{31} : Composante homopolaire de courant : nulle (couplage étoile sans neutre).

$[P_{32}(t)]$: Transformation de PARK d'un système triphasé à un système diphasique.

$[C'_{32}]$: Matrice de transformation directe de Concordia.

3-3.3.2 Modélisation dans le repère (d, q)

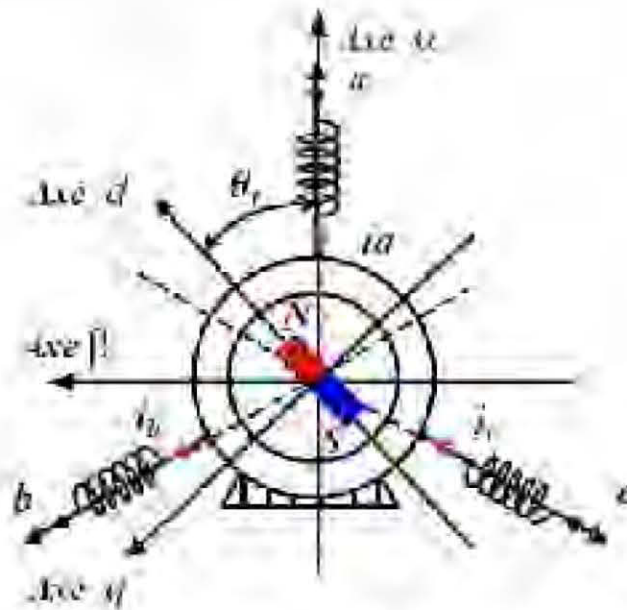


Figure 3-5 Représentation du passage de l'axe (a, b, c) à l'axe (d, q)

La Figure 3-5 représente le passage du repère triphasé (abc) au repère de Park (d, q).

Une fois toutes les opérations effectuées nous obtenons le résultat suivant :

$$[\psi_{en}] = \begin{bmatrix} L_{\sigma} & 0 \\ 0 & L_{\sigma} \end{bmatrix} [i_{dq}] + \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{sr} \\ 0 \end{bmatrix}; \psi_{sr} = \text{cte} \quad (59)$$

Nous obtenons aussi les relations suivantes sous formes matricielles

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p \cdot \omega_r \cdot \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p \cdot \omega_r \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{sf} \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{sf} = L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_f \quad (61)$$

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (62)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (63)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{sf} \quad (64)$$

En effectuant une transformation (pu) dont le choix de système de base est mentionné dans le *Tableau 3-1* et en choisissant le cycle générateur nous obtenons les équations suivantes :

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{dm} i_f \quad (65)$$

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \quad (66)$$

$$\psi_q = -L_q i_q \quad (67)$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r L_{dm} I_f \quad (68)$$

Tableau 3-1 Tableau de conversion en unité de base de la génératrice synchrone

	Stator
Tension	$U_{sref} = \sqrt{2}V_n$
Courant	$I_{sref} = \sqrt{2}I_n$
Puissance	$P_{sref} = 3V_n I_n = \frac{3}{2} U_{sref} I_{sref}$
Impédance	$Z_{sref} = \frac{U_{sref}}{I_{sref}}$
Inductance	$L_{sref} = \frac{Z_{sref}}{\omega_{ref}}$
Flux	$\psi_{sref} = \frac{U_{sref}}{\omega_{ref}} = L_{sref} I_{sref}$

La Figure 3-6 représente le circuit équivalent de la génératrice respectivement dans l'axe d et l'axe q

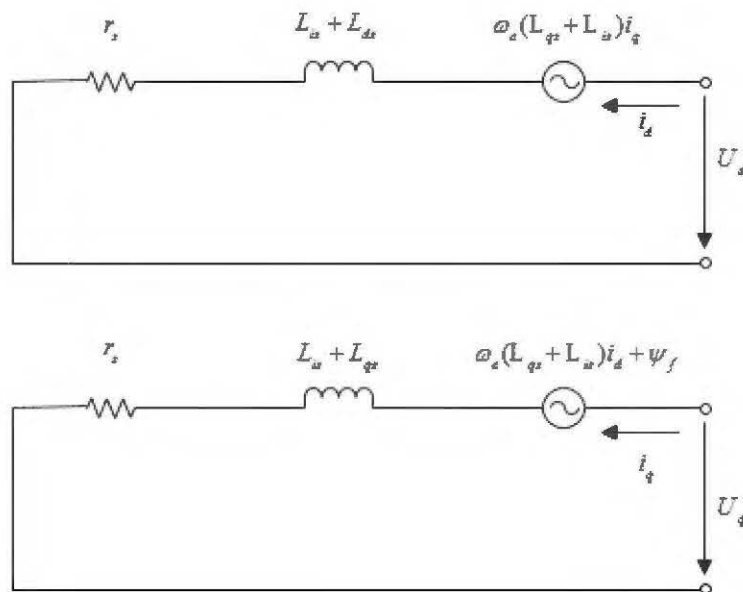


Figure 3-6 Circuit équivalent dans le repère d, q

3-3.4 Détermination du couple électromagnétique

L'expression générale du couple électromagnétique est exprimée par la relation :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (69)$$

C_{em} : Couple électromagnétique développé par le moteur

C_r : Couple résistant à la charge

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre du moteur

f_v : Coefficient total de frottement visqueux

$$C_{em} = \frac{\partial \omega_{em}'}{\partial \theta} \quad (70)$$

Où ω_{em}' représente la coénergie qui est définie à partir de l'énergie magnétique stockée dans le convertisseur et de l'état du circuit magnétique.

Pour un système linéaire l'énergie et la coénergie sont égales et pour un tel système en mouvement avec des circuits couplés on a :

$$\omega_{em}' = \omega_{em} = \frac{1}{2} [i]^T \cdot [L] \cdot [i] \quad (71)$$

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i]^T \cdot \left\{ \frac{d[L]}{d\theta} \right\} \cdot [i] \quad (72)$$

En utilisant les matrices d'inductances et de courants de la machine synchrone, il vient :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} [i_{3s}]^T \\ [i_{3r}]^T \end{bmatrix} \left\{ \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} [i_{3s}] \\ [i_{3r}] \end{bmatrix}^T \quad (73)$$

$$\frac{d}{d\theta} [L_{rr}] = 0 \quad ; \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (74)$$

$$C_{em} = p \cdot \left\{ (L_d - L_q) i_d i_q + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{sf} i_q \right\} \quad (75)$$

Comme choisit précédemment $p=1$, ce couple peut se décomposer en

$$C_p = -\sqrt{\frac{3}{2}} \psi_{sf} i_q = -L_{dm} i_q : \text{Couple principal}$$

$$C_{rel} = (L_d - L_q) i_d i_q : \text{Couple de réductance}$$

3-3.5 Modèle d'états de la GSAP sans charge

Le modèle général d'entrée-sortie de la génératrice synchrone à aimant permanent est lié au choix de vecteur d'état. Dans le cas des équations de la GSAP, dans le repère lié au rotor, les composantes du vecteur d'entrée de la machine sont les tensions V_d et V_q et les courants i_d et i_q statoriques sont les composantes du vecteur de sortie. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre les équations sous la forme suivante :

$$\frac{dx}{dt} = A[X] + B[U] \quad (76)$$

$$y = C[X] + D[U] \quad (77)$$

Nous avons bien démontré les équations :

$$V_d = -R_s i_d - L_s \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \quad (78)$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r L_{\psi_f} i_f \quad (79)$$

Depuis nous, obtenons les modèles d'états suivants :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (-R_s i_d + \omega_r L_q i_q - V_d) \quad (80)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (-R_s i_q - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f - V_q) \quad (81)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_q} & \frac{\omega_r}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ \psi_f \end{pmatrix} \quad (82)$$

3-3-6 Modèle d'état global de la GSAP développée avec une charge résistive inductive

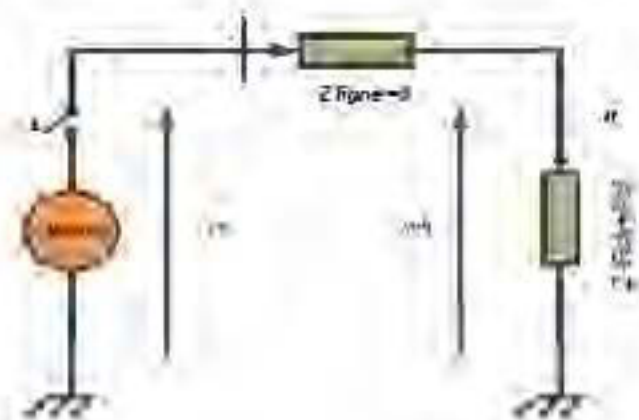


Figure 3-7 Génératrice synchrone à aimant permanent avec une charge

L'application des tensions V_d et V_q sur la charge, donne :

$$V_d = R_{ch}i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_{ch} i_q \quad (83)$$

$$V_q = R_{ch}i_q + L_{ch} \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_{ch} i_d \quad (84)$$

D'un autre côté, on a les équations aux tensions de la génératrice synchrone à aimant permanent à vide. En négligeant l'impédance de la ligne, on peut considérer l'égalité entre les tensions de la génératrice et de la charge et d'où nous avons :

$$-R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q i_q = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_{ch} i_q \quad (85)$$

$$-R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_{sf} = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_{ch} i_d \quad (86)$$

$$(L_d + L_{ch}) \frac{di_d}{dt} = -(R_s + R_{ch}) i_d + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_q \quad (87)$$

$$(L_q + L_{ch}) \frac{di_q}{dt} = -(R_s + R_{ch}) i_q - \omega_r (L_d + L_{ch}) i_d + \omega_r \psi_{sf} \quad (88)$$

Nous en déduisons les expressions des évolutions de i_d et i_q

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{(R_s + R_{ch})}{(L_d + L_{ch})} i_d + \frac{\omega_r (L_q + L_{ch})}{(L_d + L_{ch})} i_q \quad (89)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{(R_s + R_{ch})}{(L_q + L_{ch})} i_q - \frac{\omega_r (L_d + L_{ch})}{(L_q + L_{ch})} i_d + \frac{\omega_r}{(L_d + L_{ch})} \psi_{sf} \quad (90)$$

Ces équations peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{(R_s + R_{ch})}{(L_d + L_{ch})} & \frac{\omega_r (L_q + L_{ch})}{(L_d + L_{ch})} \\ -\omega_r \frac{(L_d + L_{ch})}{(L_q + L_{ch})} & -\frac{(R_s + R_{ch})}{(L_q + L_{ch})} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r}{(L_d + L_{ch})} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \psi_{sf} \end{pmatrix} \quad (91)$$

En remplaçant dans les équations, on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\left(\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} \right) L_d - R_s \right) & \left(\omega_r (L_q - L_d \left(\frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \right)) \right) \\ \omega_r (L_q \left(\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} \right) - L_d) & \left(\left(\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \right) L_q - R_s \right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_r (1 - \frac{L_q}{L_d + L_{ch}}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \psi_{sf} \end{pmatrix} \quad (92)$$

Le modèle d'état global à la forme :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(X) = [A]X + [B]\psi_{fm} \\ Y = [C]X + [D]\psi_{fm} \end{cases} \quad (93)$$

L'équation [91] peut s'écrire comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ e \end{pmatrix} \psi_{fm} \quad (94)$$

Afin d'obtenir un modèle analytique, nous utilisons les transformations de Laplace ainsi que celle de Laplace Inverse.

$$\frac{d}{dt}(X) = [A]X + [B]\psi_{fm} \quad (95)$$

$$s.X - i_0 J = [A].X + \frac{[B]}{s} \psi_{fm} \quad (96)$$

$$[s.I - A].X = \frac{[B]}{s} \psi_{fm} + i_0 J \quad (97)$$

$$(s.I - A)^{-1} = \frac{1}{\det(s.I - A)} \begin{pmatrix} s - d & b \\ c & s - a \end{pmatrix} \quad (98)$$

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{s - d}{s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2} & \frac{b}{s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2} \\ \frac{c}{s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2} & \frac{s - a}{s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{d0} \\ \frac{e}{s} \psi_{fm} + I_{q0} \end{pmatrix} \quad (99)$$

L'expression de $P = s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2$ dépend de la valeur de ζ , trois possibilités se présentent.

$$P = s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2$$

$$P = 0 \Leftrightarrow s^2 + 2s\zeta\omega_k + \omega_k^2 = 0$$

$$\Delta = 4\zeta^2\omega_k^2 - 4\omega_k^2 = 4\omega_k^2(\zeta^2 - 1)$$

$$\text{if } \zeta < 1$$

$$\Delta < 0$$

$$\text{if } \zeta = 1$$

$$\Delta = 0$$

$$\text{alors } s_1 = s_2 = -\zeta\omega_k$$

$$\text{f } \zeta > 1$$

$$\Delta > 0$$

$$\text{alors } s_1 = \omega_k(\sqrt{\zeta^2 - 1} - \zeta)$$

$$s_2 = -\omega_k(\sqrt{\zeta^2 - 1} + \zeta)$$

Comme effectué précédemment, en utilisant les tables de Laplace, les équations temporelles des courant statoriques sont donnés par les équations (100), (101) et (102) et qui dépendent de la variation de la valeur de ζ .

Dans le cas où $\zeta < 1$

$$i_d(t) = \frac{b.e.fm}{\omega_k^2} + \left[\begin{array}{l} (I_{d0} \sin(\alpha t + \Phi_1) \sqrt{\left(\frac{d}{\omega_k} + \zeta\omega_k\right)^2} \\ \frac{1}{1-\zeta^2} + 1) + \dots \\ I_{q0} \frac{b}{\alpha} \sin(\alpha t) - \frac{b.e}{\alpha\omega_k} \sin(\alpha t + \Phi_2) \end{array} \right] e^{-\zeta\omega_k t} \quad (100)$$

$$i_q(t) = \frac{-a.e.fm}{\omega_k^2} + \left[\begin{array}{l} (I_{d0} \frac{c}{\alpha} \sin(\alpha t) + I_{q0} \sin(\alpha t + \Phi_3) \sqrt{\left(\frac{a}{\omega_k} + \zeta\omega_k\right)^2} \\ \frac{1}{1-\zeta^2} + 1) - \dots \\ \frac{e}{\alpha} \sin(\alpha t + \Phi_4) \sqrt{\left(\frac{a}{\omega_k} + \zeta\right)^2} \\ + (1-\zeta^2) \end{array} \right] e^{-\zeta\omega_k t}$$

Avec

$$\alpha = \omega_k \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$\Phi_1 = a \tan 2(\alpha, -(d + \zeta \omega_k))$$

$$\Phi_2 = \cos(\zeta)^{-1}$$

$$\Phi_3 = a \tan 2(\alpha, -(a + \zeta \omega_k))$$

$$\Phi_4 = a \tan 2(\alpha, -(a + \zeta \omega_k)) - a \tan 2\left(\frac{\alpha}{\omega_k}, -\zeta\right)$$

Dans le cas $\zeta = 1$

$$i_d(t) = \frac{b.e.fm}{\omega_k^2} + \left[I_{d0}(1 - (d + \zeta \omega_k)t) + I_{q0}bt - \frac{b.e.fm}{\omega_k^2} - b.e.fm.\omega_k.t \right] .e^{-\zeta \omega_k t} \quad (101)$$

$$i_q(t) = \frac{-a.e.fm}{\omega_k^2} + \left[(I_{d0}.c.t + I_{q0}(1 - (a + \zeta \omega_k)t) - \frac{a.e.fm}{\omega_k^2} + e.fm.\omega_k(\zeta \omega_k + a).t \right] .e^{-\zeta \omega_k t}$$

Dans le cas $\zeta > 1$

$$i_d(t) = \frac{b.e.fm}{\omega_k^2} + \frac{1}{(s_2 - s_1)} \left[-I_{d0}(d + s_1) + I_{q0}bs_1 - \frac{b.e.fm}{s_1} \right] .e^{-s_1 t} + \dots$$

$$\left[I_{d0}(d + s_2) - I_{q0}bs_2 - \frac{b.e.fm}{s_2} \right] .e^{-s_2 t} \quad (102)$$

$$i_q(t) = \frac{-a.e.fm}{\omega_k^2} + \frac{1}{(s_2 - s_1)} \left[I_{d0}.c.s_1 - I_{q0}(a + s_1) + \frac{(a + s_1).e.fm}{s_1} \right] .e^{-s_1 t} + \dots$$

$$\left[-I_{d0}.c.s_2 + I_{q0}(a + s_2) - \frac{(a + s_2).e.fm}{s_2} \right] .e^{-s_2 t}$$

3.4. Simulation et validation expérimentale

3-4.1 Dispositif expérimental

La *Figure 3-8* présente une synoptique du dispositif expérimental effectué au Laboratoire, nous avons utilisé un drive pour stabiliser la fréquence de rotation du moteur asynchrone ($f=30\text{ Hz}$) ce qui correspond à une fréquence de 60 Hz pour la génératrice synchrone à aimants permanents. La génératrice est reliée à un contacteur qui par la suite est relié à une charge résistive inductive. Le rôle du contacteur est primordial, car comme ça sera présenté par la suite, il permettra d'effectuer les divers essais. La *Figure 3-9* est une photo prise au laboratoire lors des essais sur la machine. Le *Tableau 3-2* montre les valeurs de la fiche technique de la GSAP qui ont été utilisées pour les simulations des deux modèles analytique et numérique en vue de comparaison avec les courbes expérimentales.

Tableau 3-2 Paramètres de la génératrice simulée et expérimentée au Laboratoire

Paramètre	Valeur
Résistance statorique	1 Ω
Inductance statorique	5.2 mH
Vitesse de rotation	900 tr/min
Nombre de paires de pôles	4

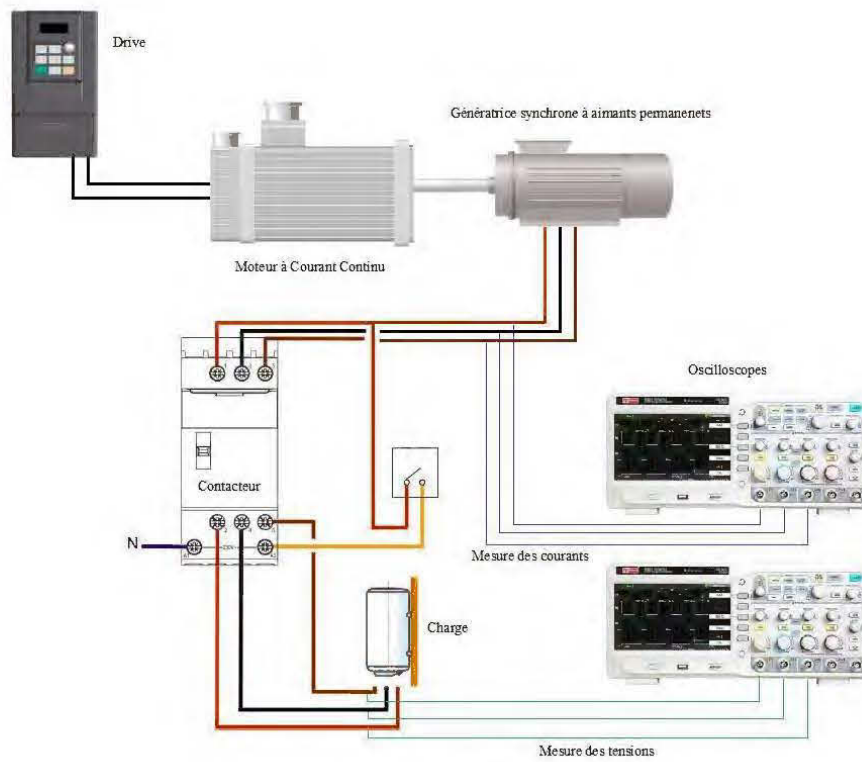


Figure 3-8 Synoptique du dispositif expérimental

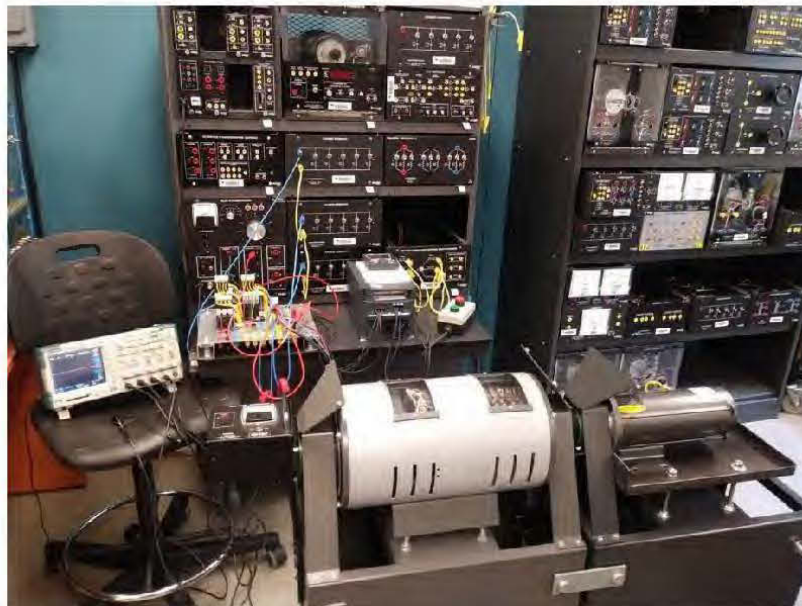


Figure 3-9 Montage effectué au laboratoire

3-4.2 Simulation de la GSAP développée avec la charge

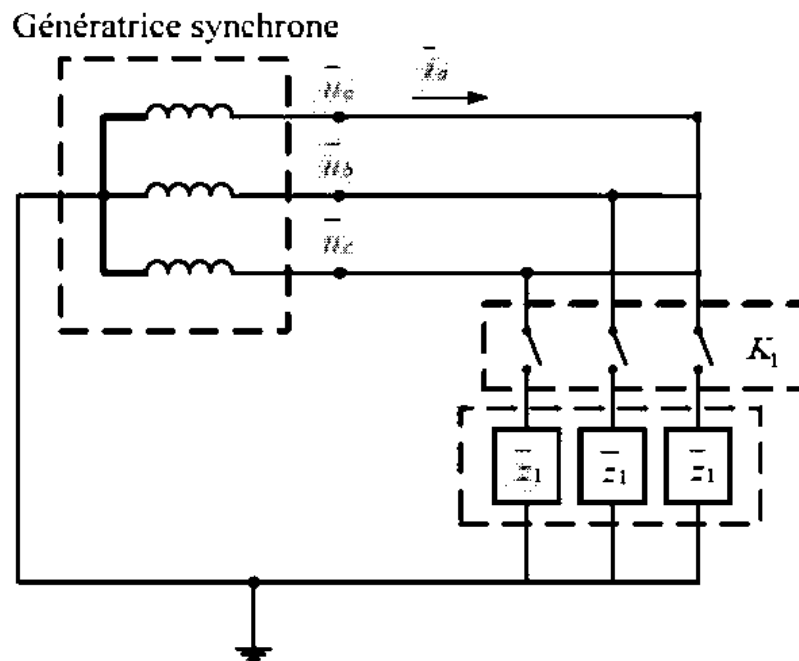


Figure 3-10 Synoptique de la génératrice montée sur une charge

La Figure 3-10 présente un schéma simplifié pour les essais d'enclenchement et de délestage. Les impédances Z_1 , Z_2 et Z_3 sont celles de la charge résistive inductive. Lors des essais, nous remarquons que la vitesse de rotation n'est pas constante ce qui peut engendrer un problème au niveau des validations. Pour cela nous avons eu recours à la méthode SOGI-FLL, celle-ci nous permet d'effectuer deux choses, la première est de filtrer le signal d'entrée qui est le signal expérimental qu'il s'agisse du courant ou de la tension, en deuxième lieu, elle permet d'aller chercher la variation réelle de la fréquence du système et ainsi adapter les modèles de simulation à cette dernière afin d'obtenir une validation avec le minimum d'erreur possible. La Figure 3-11 présente le bloc-diagramme de la méthode en question et qui sera utilisé lors de la programmation.

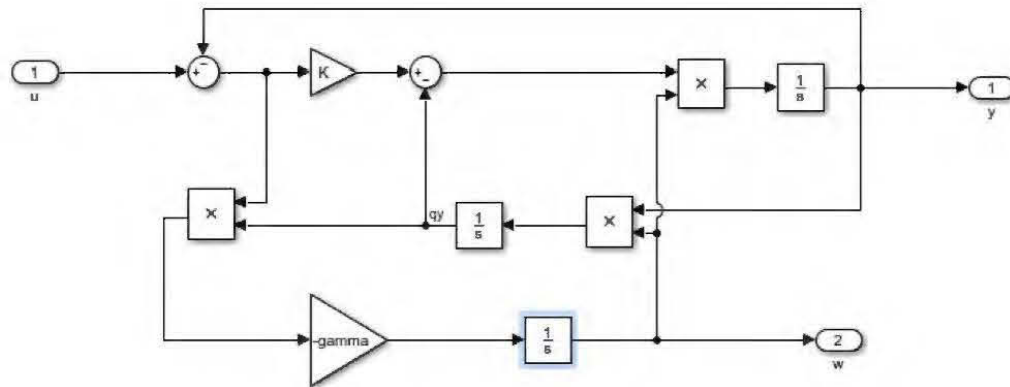


Figure 3-11 Schéma block du filtre SOGI-FLL

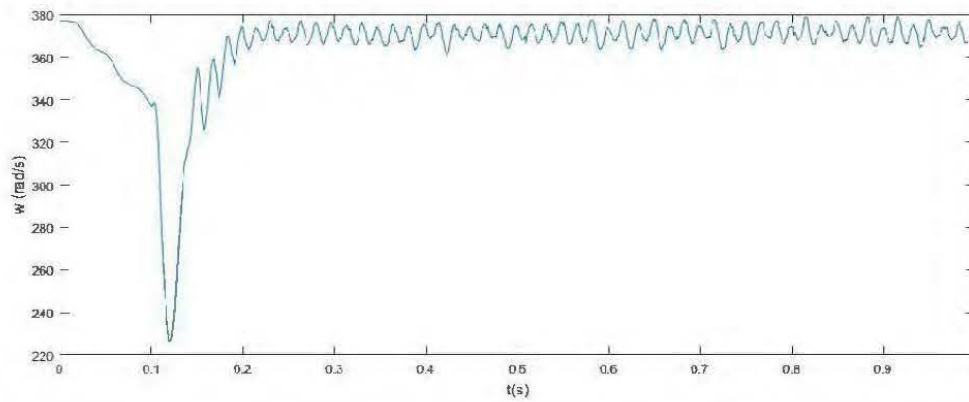


Figure 3-12 Evolution de la vitesse de rotation de la GSAP lors des essais

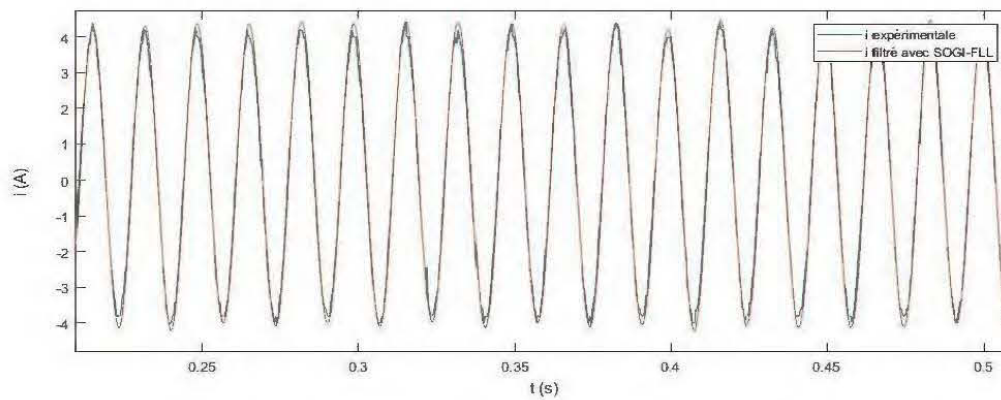


Figure 3-13 Entrée et sortie du signal expérimental passant par le filtre SOGI

La *Figure 3-12* démontre que lors des essais la vitesse de rotation de la génératrice n'est pas stable, l'utilisation de la partie *FLL* du filtre adopté permet d'aller chercher cette variation et de trouver la valeur moyenne correspondante et ainsi l'utiliser comme donnée d'entrée pour les modèles numérique et analytique.

Le signal de sortie de la GSAP n'est pas un signal parfaitement lisse, la *Figure 3-13* présente un signal de courant avant et après l'utilisation du filtre *SOGI*, nous constatons très bien la disparition des bruits et nous obtenons ainsi un signal bien filtré qui peut être comparé par la suite avec les signaux simulés.

Dans ce travail nous avons opté pour deux simulations, en premier lieu un essai d'enclenchement et ensuite un essai de délestage.

3.4.2.1. Essai d'enclenchement

La génératrice étant en arrêt, à l'instant $t = 0.1$ s nous fermons les interrupteurs de K1 ainsi notre génératrice est développée sur une charge. Les *Figures 3-14 et 3-15* présentent respectivement une comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations effectuées sur Matlab au niveau du modèle analytique et du modèle numérique pour la tension et le courant pour un essai d'enclenchement.

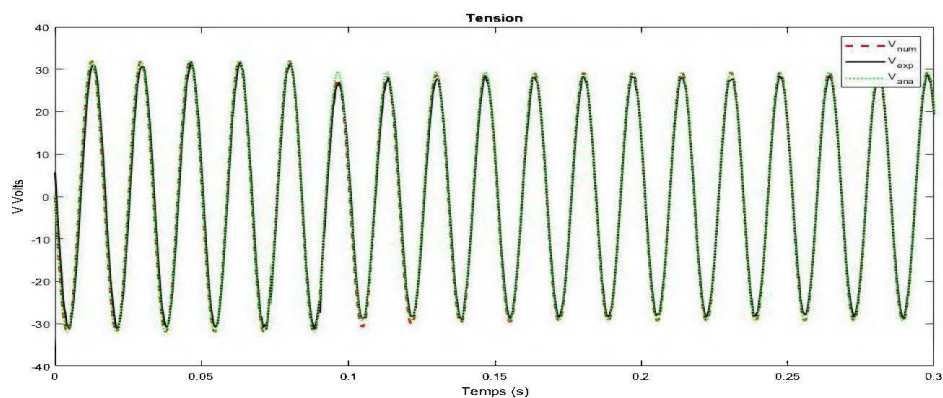


Figure 3-14 Evolution et comparaison de la tension de sortie de la GSAP

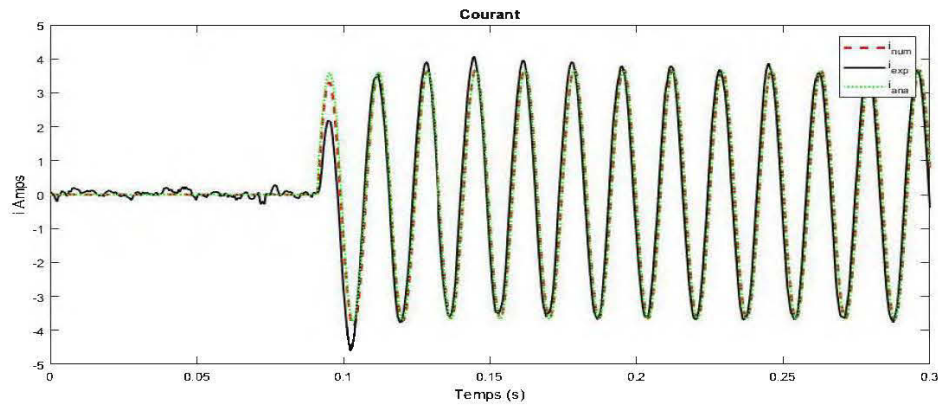
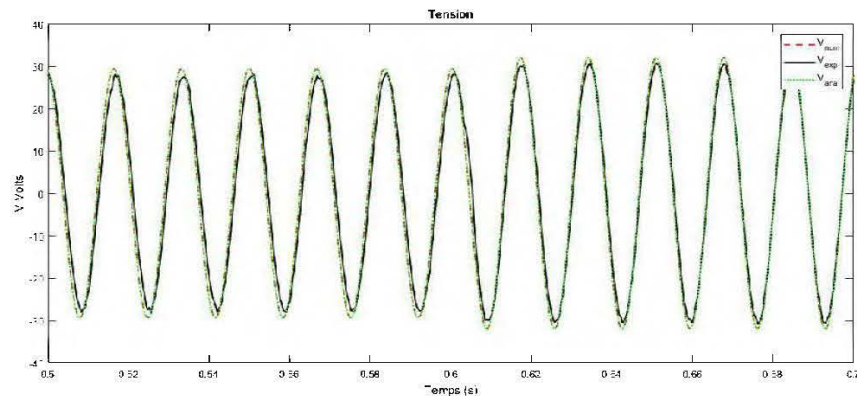


Figure 3-15 Evolution et comparaison du courant de sortie de la GSAP

Nous remarquons une bonne concordance entre les deux modèles et le signal expérimental, d'une part cela démontre la robustesse des modèles développés précédemment et d'une autre part le rôle qu'a joué le filtre pour obtenir la bonne vitesse de rotation et ainsi la bonne fréquence qui a permis de synchroniser les signaux

3.4.2.2. Essai de délestage

La génératrice étant en marche, à l'instant $t = 0.6$ s nous ouvrons les interrupteurs de K1 ainsi notre génératrice est délestée. La Figure 3-16 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations effectuées sur Matlab au niveau du modèle analytique et du modèle numérique pour la tension et le courant pour un essai de délestage.



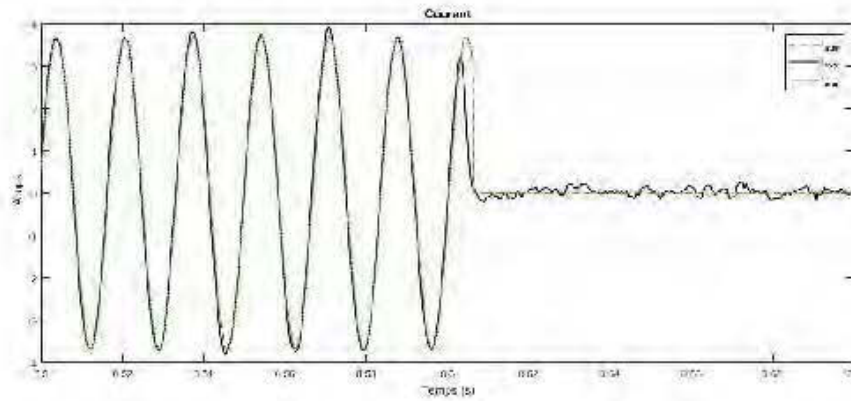


Figure 3-16 Evolution et comparaison de la tension et du courant de sortie de la GSAP

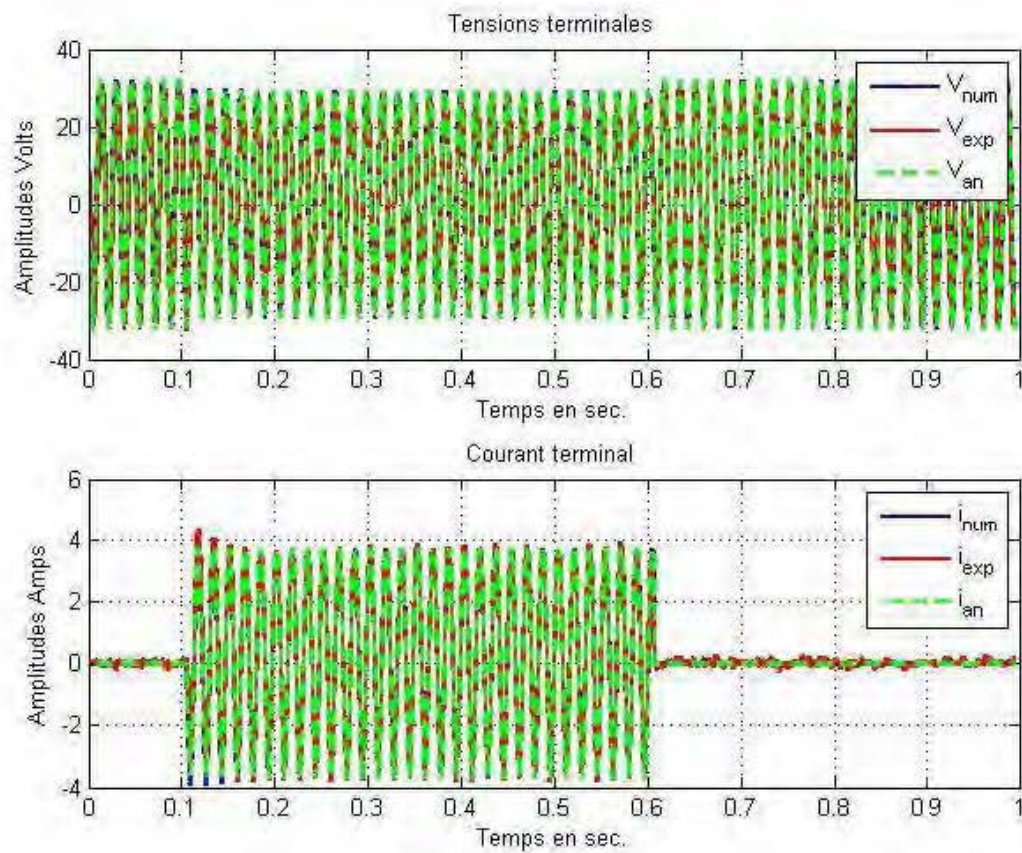


Figure 3-17 Essai d'enclenchement et de délestage successifs

La *Figure 3-17* présente un essai d'enclenchement et de délestage successifs, permettant ainsi de vérifier la stabilité et la robustesse du modèle proposé. La Figure illustre l'évolution de la tension et du courant sur une phase.

3.5. Conclusion

La GSAP est une partie très importante du système aérogénérateur, et nous pouvons même dire qu'elle représente le cœur du système, d'où l'intérêt de l'étudier profondément.

Ainsi dans ce chapitre nous avons analysé la GSAP et présenté son principe de fonctionnement, mais aussi développé sa mise en équation que ce soit d'un côté purement numérique ou d'un autre analytique, ce qui permettra de faire une étude du système et par l'occasion parvenir à prévoir les réponses de la machine dans diverses situations qui affecteront la production et les paramètres de sortie comme l'a été démontré à la fin du chapitre.

Nous avons par ailleurs validé ces modèles avec des essais expérimentaux et nous avons constaté que le fait d'utiliser le filtre de SOGI-FLL a grandement aidé à synchroniser les signaux simulés aux signaux réels des essais au laboratoire.

Chapitre 4

Conversion de puissance et stratégie de commande

Les systèmes précédemment présentés et développés permettent en occurrence de produire de l'énergie, mais les laissés sans contrôle ni régulation, ces derniers et comme tout autre système ne seront jamais capable de combler le besoin d'une charge et même si c'est le cas, la production en question ne sera pas optimale et le système ne sera pas rentable.

En vue de cela, dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude d'une stratégie de commande et de stockage qui permettra à la fois d'optimiser la production, de réguler le système et de gérer l'énergie excédante ou déficiente. Dans le système étudié, nous pouvons distinguer deux types de stratégies de commande. La première s'intéresse à l'outil de conversion à savoir l'éolienne et le panneau photovoltaïque servant à aller chercher le point optimal de fonctionnement. La seconde quant à elle s'applique sur les équipements de conversion de puissance « équipements électroniques » permettant de réguler les tensions, les courants et l'orientation des flux.

4.1. Conversion de puissance

L'objectif principal des convertisseurs statiques de puissance est de produire des ondes de courants alternatifs en sortie à partir d'une source de courant continu. La présentation de ces composants est nécessaire vu que leur utilisation est impérative au niveau de l'aérogénérateur (*Figure 4-1*) et des modules photovoltaïques (*Figure 4-2*). Ainsi nous présenterons dans ce chapitre une vague description des différents composants servant à établir la conversion de puissance.

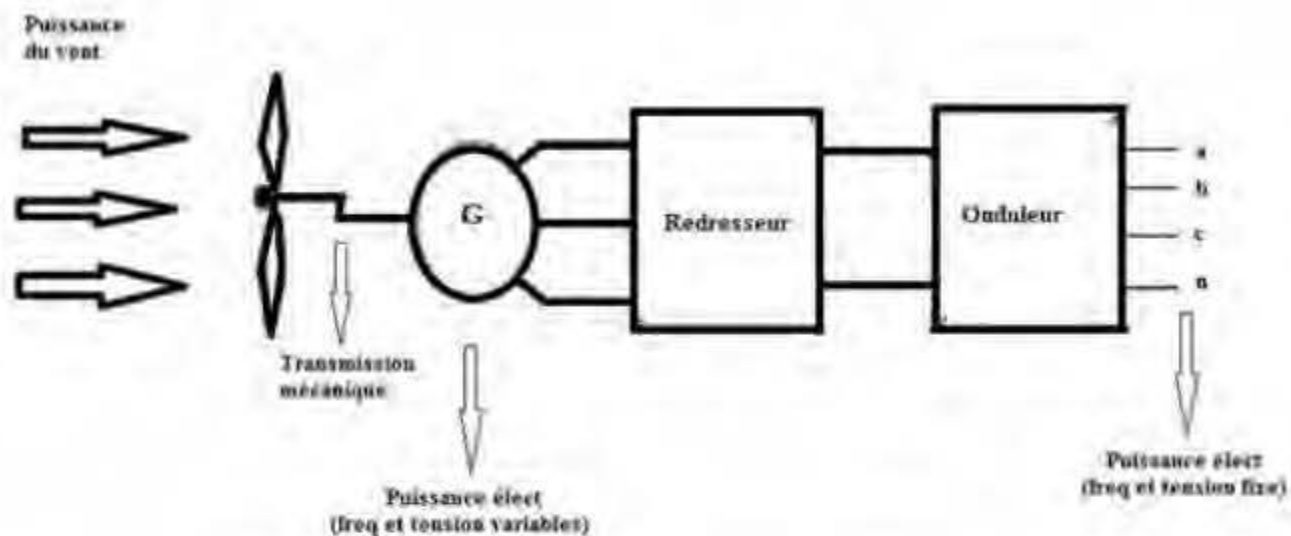


Figure 4-1 Modèle de conversion au niveau de l'aérogénérateur

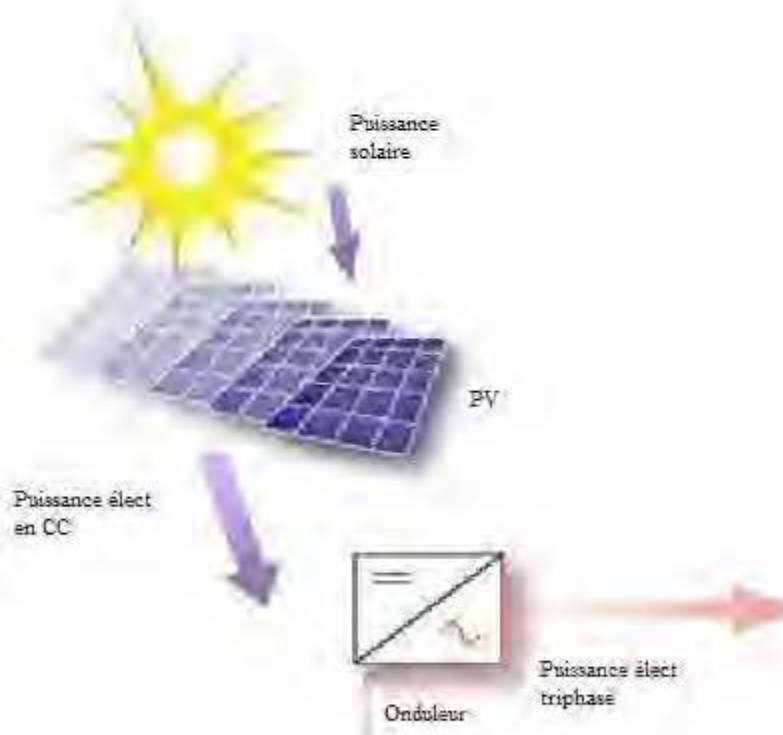


Figure 4-2 Modèle de conversion au niveau du panneau photovoltaïque

A la sortie de l'aérogénérateur le courant est déjà triphasé, mais ceci n'est pas suffisant, car la fréquence et la tension sont variables d'où l'utilité de passer par un système redresseur/onduleur et ainsi stabiliser la fréquence et la tension de sortie selon celles du réseau ou d'utilisation requise.

La *Figure 4-2* nous fait part du chemin de conversion de la puissance pour un module photovoltaïque. Dans ce cas-ci, l'utilisation d'un onduleur seulement est requise, car à la sortie du générateur photovoltaïque le courant est continu.

Dans ce qui suit, nous allons détailler les divers composants généralement utilisés en conversion de puissance

4.1.1. Les Onduleurs

4.1.1.1. Le redresseur

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. Il est principalement constitué par un pont de diode comme le montre la *Figure 4-3 (a)*. Afin de commander celui-ci, on dispose des transistors parallèlement à chaque diode et ainsi on peut contrôler la tension et le courant de sortie comme le montre la *Figure 4-3 (b)* [14].

Sur les deux *Figures 4-3 (a) et 4-3 (b)* nous remarquons l'utilisation d'une capacité et d'une inductance, leurs rôles sont de filtrer les signaux de sortie (supprimer toute ondulation résiduelle afin d'obtenir un signal continu aussi pur que possible)

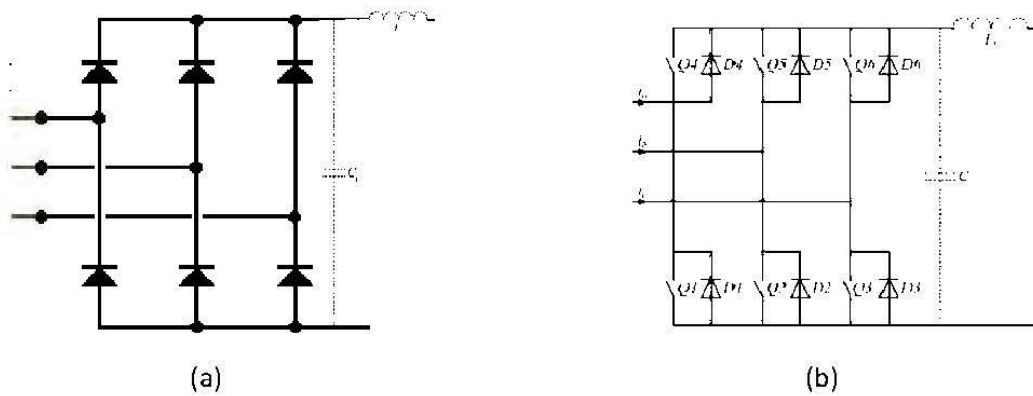


Figure 4-3 Modèle du redresseur

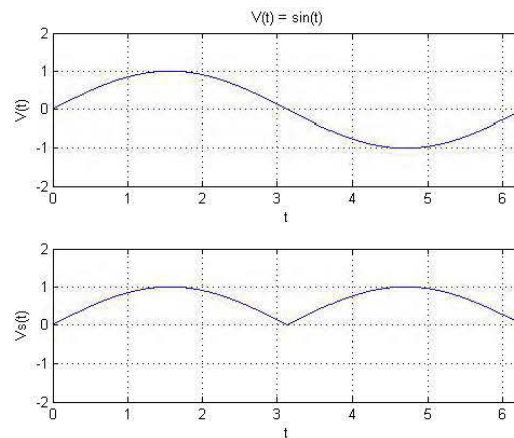


Figure 4-4 Tension de sortie du redresseur

La Figure 4-4 nous montre l'effet du redresseur sur la tension d'entrée qui à la base était sinusoïdale. La courbe en rouge représente la tension redressée à la sortie, mais puisqu'on a inséré une capacité et une inductance dans le circuit, nous pouvons très bien remarquer la courbe discontinue qui représente la tension moyenne constante qui sera obtenue comme sortie finale.

4.1.4.1. Onduleur monophasé

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance. Ils sont utilisés dans tout système électrique où la transformation de la tension continue (Vdc) en tension alternative (Vac) est nécessaire.

Le concept de base des onduleurs est aisément compréhensible et il est indépendant de la technologie utilisée. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue.

C'est pourquoi la partie centrale d'un onduleur est fréquemment constituée d'un pont à semi-conducteurs permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'un interrupteur électronique (transistor).

Le schéma fonctionnel qui en résulte montre un onduleur en bon ordre de marche au niveau technique et pouvant être utilisé, tel quel pour l'alimentation de charge alternative est représentée sur la figure ci-dessous [15].

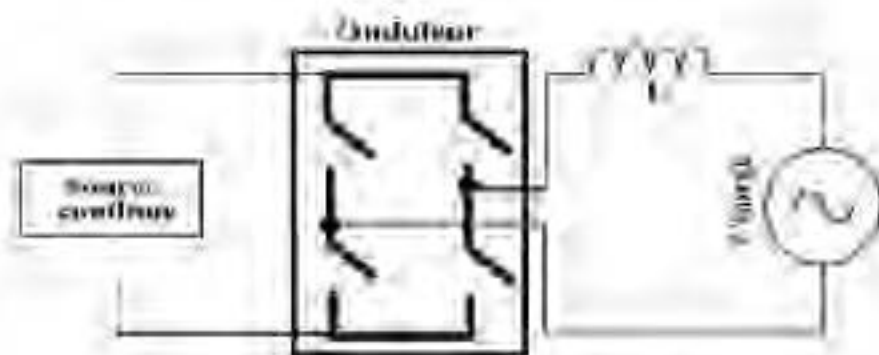


Figure 4-5 Modèle de l'onduleur monophasé [15]

L'onduleur délivre plusieurs créneaux positifs et négatifs (Figure 4-6), ce qui permet de diminuer l'importance du filtre et d'avoir un régulateur de tension plus rapide. En modulant les temps relatifs de conduction et de blocage, il est possible de répartir la tension au cours de la période de façon à ce que pratiquement le temps de conduction d'un interrupteur soit proportionnel à la valeur instantanée du fondamental [15].

C'est ce principe qui est appelé Modulation de Largeur d'Impulsion et qui est noté MLI (PWM en anglais)

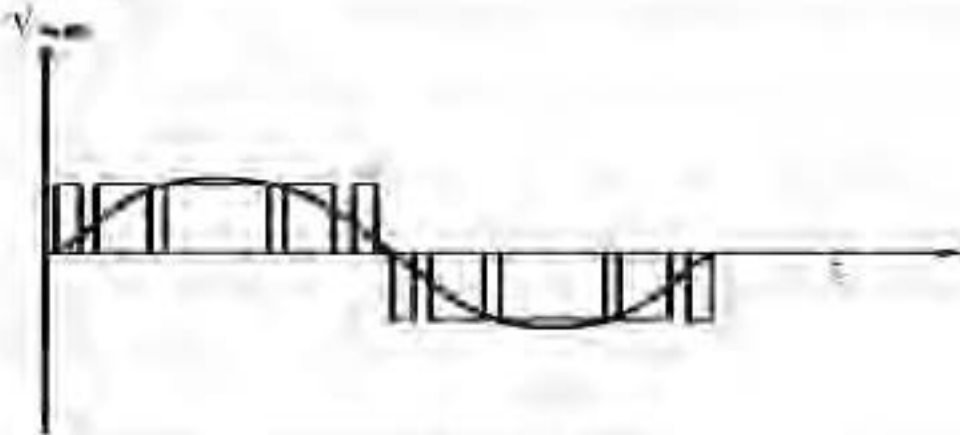


Figure 4-6 Modulation de largeur d'impulsion [15]

4.3.4.2 Onduleur triphasé

Les onduleurs monophasés et triphasés ont le même principe à une différence près au niveau du nombre de ponts de diode et du fait que ces derniers (onduleurs triphasés) nous permettent d'obtenir un courant alternatif triphasé à la sortie.

En raison du fait que les courants de ligne à courant alternatif i_{oa} , i_{ob} , et i_{oc} (Figure 4-8) disposent d'une grande di/dt, un filtre capacitif doit être connecté aux bornes à courant alternatif dans des applications de charge inductive. Ainsi, des tensions de charges sinusoïdales sont générées, qui justifie l'utilisation de ces topologies dans les applications industrielles, moyenne tension, où les formes d'onde de tension de haute qualité sont nécessaires. Afin de bien garder les convertisseurs de puissance d'un courant triphasé CSI, deux contraintes principales doivent toujours être remplies :

- Le côté à courant alternatif est principalement capacitif, donc, il ne doit pas être court-circuité, ce qui implique que, tout au plus un commutateur haut (1, 3, ou 5 [Figure 4-7]) et un commutateur inférieur (4, 6, ou 2 [Figure 4-7]) devraient être fermé à tout moment.

- Le bus de courant continu est du type de source de courant, et donc il ne peut pas être ouvert ; par conséquent, il doit y avoir au moins un commutateur haut (1, 3, ou 5 [Figure 4-7]) et un commutateur inférieur (4, 6, ou 2 [Figure 4-7]) fermé en tout temps.

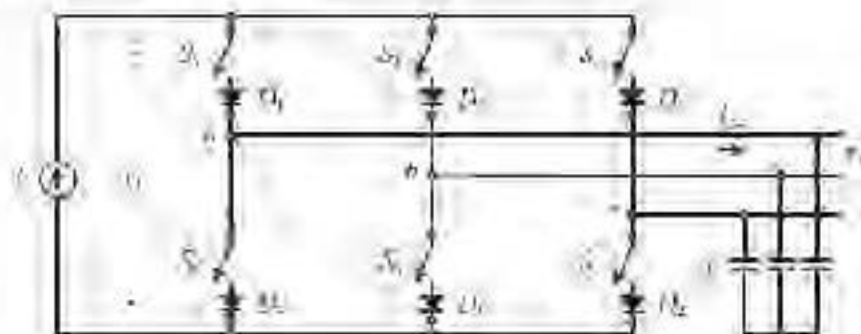


Figure 4-7 Topologie d'un onduleur de courant triphasé. [16]

Notons que les deux contraintes peuvent être résumées en disant que, à tout moment, un seul commutateur haut et un commutateur bas doivent être fermés. [16]

Le courant alternatif délivré par un onduleur triphasé est donné par une décomposition en série de Fourier (équation (103) ex. du courant i_a). Seul l'harmonique d'ordre 1 est important, car elle représente le signal sinusoïdal utile (50Hz ou 60Hz) le reste est éliminé grâce au filtre capacitif. [16]

$$i_a = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4I_c}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \sin\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right) \quad (103)$$

4.2. Stratégie de commande

4.2.1. Stratégie de commande de l'éolienne

4.2.1.1 Zone de fonctionnement des éoliennes et le pitch angle Control

La courbe de puissance récupérable par les éoliennes est généralement fournie par les constructeurs, celle-ci permet de distinguer quatre zones identifiées par la vitesse du vent tel que montré sur la *Figure 4-8* [17].

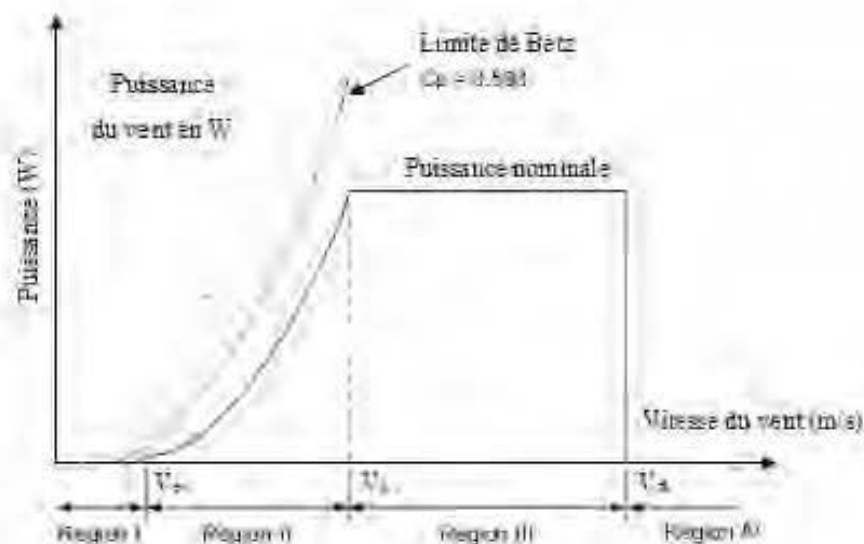


Figure 4-8 Zone de fonctionnement des éoliennes

Zone I : Bien que le vent porte une certaine énergie, celle-ci n'est pas suffisante, car la vitesse du vent ne permet pas de faire tourner les pales ni le rotor de l'éolienne.

Zone II : En atteignant une certaine vitesse appelée « Vitesse d'enclenchement » V_c , l'éolienne commence à tourner, cette vitesse est généralement de l'ordre de 2.5 à 4 m/s dépendamment de la grandeur de l'éolienne et elle est donnée par le constructeur. La zone II

est comprise entre la vitesse d'enclenchement et la vitesse nominale. Pour chaque vitesse du vent, le système tend à récupérer le maximum de puissance développée.

Zone III : La puissance du vent devient très importante sauf que celle récupérée par l'éolienne reste limitée et tend toujours vers la puissance nominale c'est à partir de cette zone-là que le contrôle devient important afin d'optimiser l'énergie extraite. Le contrôle se fait en commandant l'angle des pales et ainsi l'angle d'incidence.

Zone IV : La vitesse du vent dépasse une vitesse appelée vitesse de décrochage ou vitesse d'arrêt définie aussi par les constructeurs comme la vitesse d'enclenchement. Présentement, la valeur est estimée à 25 m/s pour presque toutes les éoliennes. Au-delà de cette vitesse, l'éolienne est soumise à de fortes contraintes mécaniques qui peuvent causer dans certains cas la destruction complète de l'éolienne. C'est pour cela qu'à partir de cette vitesse l'angle des pales forme 90° (pales mises en drapeaux) forçant ainsi l'arrêt complet de l'éolienne pour éviter tout dommage ou accident.

Comme expliqué précédemment l'angle d'incidence à une importance capitale. La méthode globale de commande est appelée « Pitch angle Control », celle-ci permet de contrôler la puissance générée pour plusieurs vitesses du vent et elle peut se faire de diverses façons. Nous citons ici deux exemples de contrôles, le premier se base sur la comparaison de la puissance de références de l'éolienne par rapport à la puissance électrique à la sortie du système comme le montre la Figure 4-9, le second se base sur la comparaison de la vitesse de rotation nominale en *pu* par rapport à la vitesse de rotation du rotor de la génératrice installée sur l'éolienne comme le montre la Figure 4-10 [18].

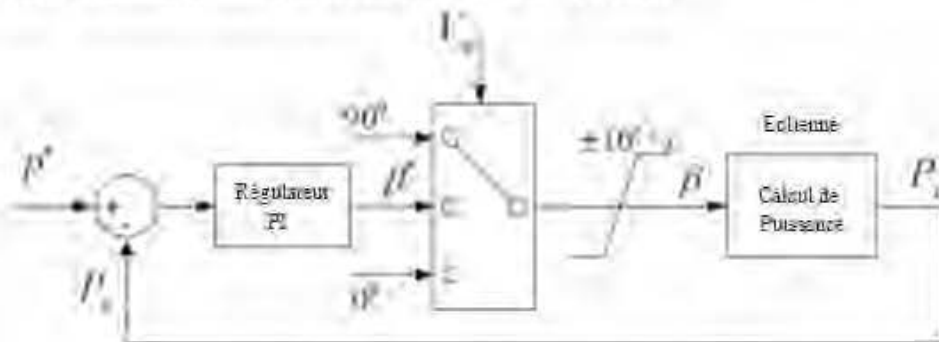


Figure 4-9 pitch angle control basé sur la puissance

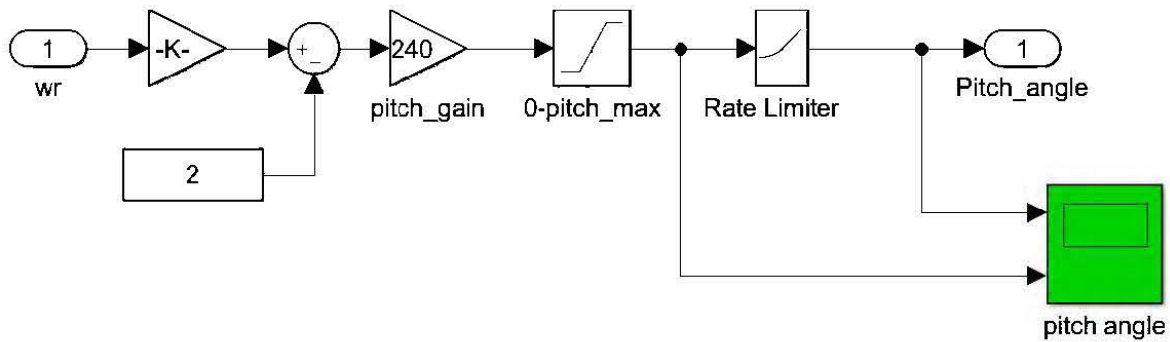


Figure 4-10 pitch angle control basé sur la vitesse de rotation

4.2.1.2. Technique MPPT

Contrairement à la commande de l'angle d'incidence « Pitch angle Control », la commande MPPT est appliquée quand la vitesse du vent est plus faible que la vitesse nominale de l'éolienne prévue par les constructeurs. Diverses techniques peuvent être utilisées pour le MPPT (Maximum Power Point Tracking).

- Contrôle de la vitesse spécifique λ (TSR)

Pour chaque éolienne, il existe un TSR optimal dépendamment de la vitesse du vent. Si cette valeur est constante alors nous sommes certains d'extraire le maximum d'énergie. Donc la technique en question consiste à appliquer une commande qui cherche à garder la vitesse spécifique constante en cours de fonctionnement. La Figure 4-11 montre la courbe optimale de λ permettant d'extraire le maximum de puissance d'une éolienne en fonction des vitesses du vent. [19].

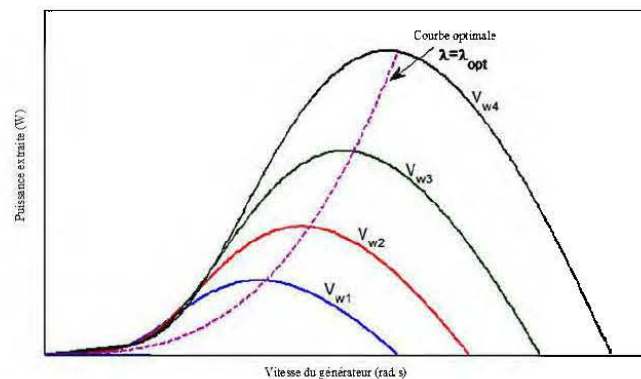


Figure 4-11 Courbe optimale de la vitesse spécifique ou TSR

- Contrôle du couple optimal

Comme mentionné précédemment en s'assurant d'avoir un λ_{opt} nous avons le maximum de puissance et par conséquent nous pouvons en extraire le maximum du couple, ceci est présenté à la Figure 4-12. Le principe de cette méthode est d'ajuster le couple de la GSAP selon un couple de référence correspondant à une puissance maximale de l'éolienne. [19].

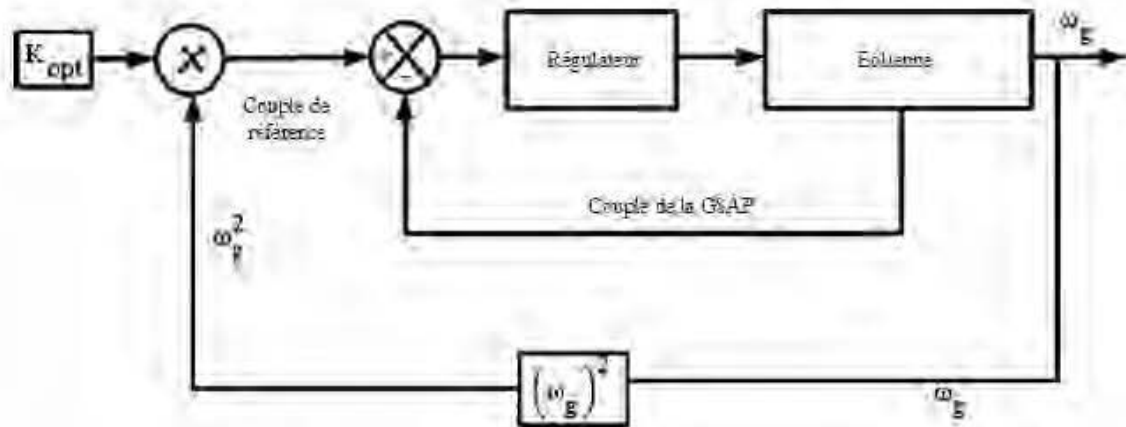


Figure 4-12 Contrôle du couple optimal

Il existe par ailleurs d'autres modèles de commande dont nous pouvons citer le contrôle par retour d'état de la puissance, le contrôle par perturbation et observation ou bien le contrôle par la méthode de la logique floue. Le Tableau 4-1 représente les caractéristiques des diverses méthodes discutées de la MPPT [19].

Tableau 4-1 Comparaison entre les méthodes de régulation de la MPPT

Technique	Complexité	Vitesse de convergence	Apprentissage et adaptation	Mesure de la vitesse du vent	Performance
Contrôle du TSR	Simple	Rapide	Non	Oui	Très bonne
Contrôle du couple optimal	Simple	Rapide	Oui	Non	Très bonne
Contrôle du retour de puissance	Simple	Rapide	Oui	Oui	Bonne
Perturbation et Observation	Simple	Variable	Non	Non	Bonne
Contrôle par logique floue	Complexe	Moyenne	Oui	Non	Bonne

4.2.2. Stratégie de commande du panneau photovoltaïque

Du côté du panneau photovoltaïque, la commande la plus répandue est la commande MPPT. Le module PV étant relié à un hacheur qui lui de son côté est commandé par l'algorithme de la MPPT comme l'illustre la *Figure 4-13*.

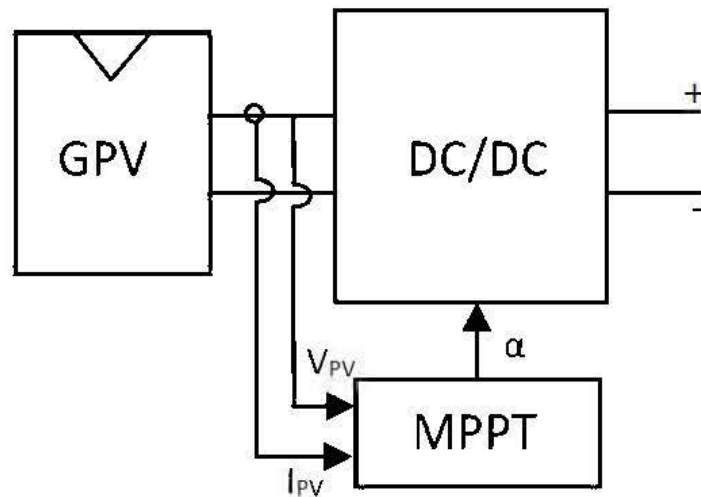


Figure 4-13 Schéma de principe d'un module PV avec son convertisseur DC/DC commandé par la MPPT

La Figure 4-14 représente l'algorithme de commande de la MPPT. Cet algorithme est basé sur le contrôle adaptatif. Le système démarre avec un rapport cyclique α_0 pour une puissance initiale P_{mi} . Les mesures, du courant et de la tension délivrés par le panneau photovoltaïque, permettent de calculer la puissance P_{pv} qui sera comparée à la puissance P_{mi} . En vue de la différence entre les deux, le rapport cyclique α va s'ajuster afin de permettre d'aller chercher la puissance nominale.

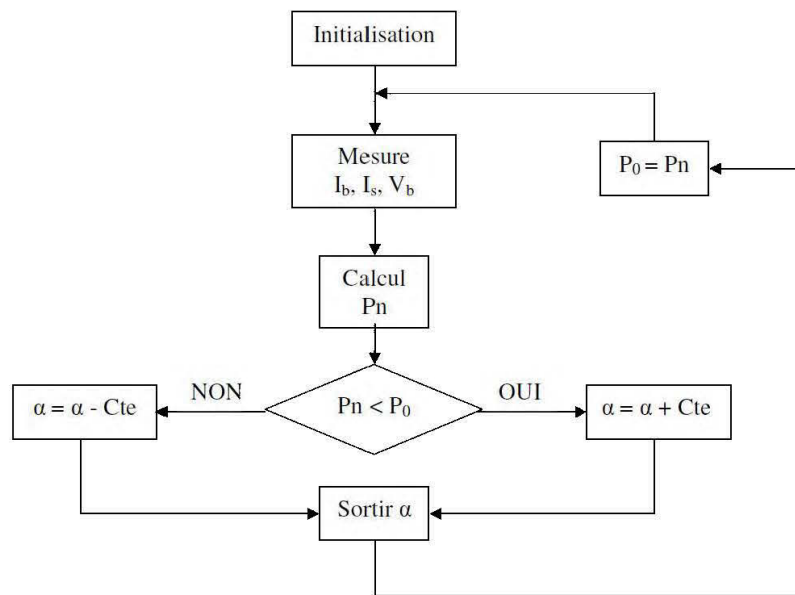


Figure 4-14 Algorithme de commande de la MPPT

4.2.3. Stratégie de commande de la GSAP

La commande de la génératrice synchrone à aimants permanents peut s'effectuer de deux manières, soit par commande scalaire ou par commande vectorielle. La classification générale est donnée par la *Figure 4-15* [18]. La méthode scalaire la plus connue et utilisée est le contrôle du nom Volt/Hertz (V/Hz), elle est basée sur le contrôle en régime stationnaire. La commande vectorielle d'un autre côté permet le contrôle dynamique de la GSAP. Le contrôle par orientation du flux a été développé depuis les années 1970 et il a prouvé son efficacité depuis. La commande *FOC* consiste à orienter le flux (rotorique ou statorique) selon un des deux axes de Park. Le choix le plus répandu est d'orienter le flux selon l'axe d de la machine afin d'annuler la puissance réactive à la sortie de la génératrice. Pour se faire, les courants i_d et i_q sont comparés à des valeurs de référence i_d^* et i_q^* . Pour s'assurer d'aligner les flux selon l'axe d, la valeur de référence du courant de l'axe d est choisie comme $i_d^* = 0$. Un modèle du schéma block est présenté sur la *Figure 4-16*.

Le contrôle des courants se fait par des correcteurs PI. Afin de déterminer les gains des correcteurs, nous utilisons la méthode de placement des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée.

Le schéma bloc de la boucle de régulation du courant i_d est donné par la Figure 4-17 [20]

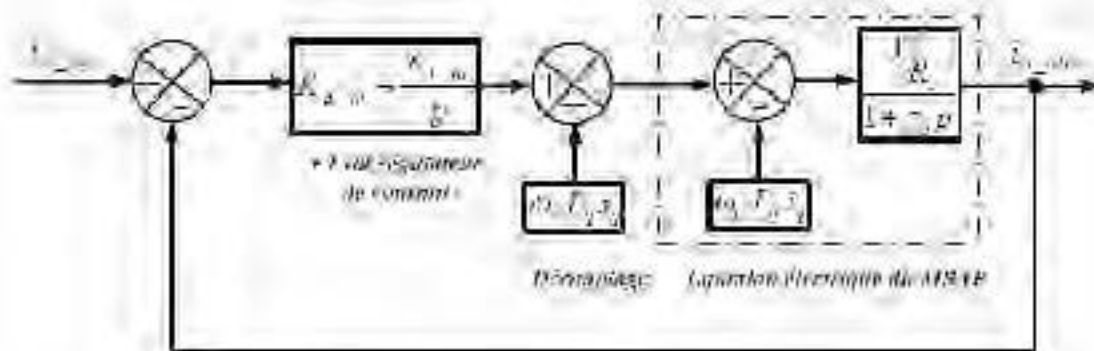


Figure 4-17 Schéma bloc de régulation du courant i_d .

Le correcteur PI de courant selon l'axe d s'écrit sous la forme

$$C_d(p) = K_{a,d} \frac{1 + \tau_{a,d} p}{\tau_{a,d} p} \quad (104)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit

$$FT_{BO}(p) = K_{a,d} \frac{1 + \tau_{a,d} p}{\tau_{a,d} p} \frac{1}{1 + \tau_{\sigma} p} \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau_{\sigma} p} \quad (105)$$

En compensant le pôle dominant comme suit $\tau_w = \tau_{\sigma}$, la fonction de transfert devient

$$FT_{BO}(p) = K_{a,d} \frac{1}{\tau_{a,d} p} \frac{1}{1 + \tau_{\sigma} p} \frac{1}{R_s} \quad (106)$$

Ainsi nous pouvons écrire la fonction de transfert en boucle fermée selon l'axe d

$$FT_{B.F}(p) = \frac{i_d(p)}{i_d^*(p)} = \frac{K_{id}}{R_s \tau_{id} \tau_\sigma} \frac{1}{p^2 + \frac{1}{\tau_\sigma} p + \frac{K_{id}}{R_s \tau_{id} \tau_\sigma}} \quad (107)$$

Soit :

$$\frac{i_d(p)}{i_d^*(p)} = \frac{\omega_{0d}^2}{p^2 + 2\xi\omega_{0d}p + \omega_{0d}^2} \quad (108)$$

$$\text{Avec} \quad \omega_{0d}^2 = \frac{K_{id}}{R_s \tau_{id} \tau_\sigma} \quad ; \quad \tau_\sigma = T_e + T_{sw} \quad ; \quad \tau_{id} = \frac{X_d}{R_s}$$

ξ Coefficient d'amortissement

T_e Période d'échantillonnage

T_{sw} Période de commutation

R_s Résistance du stator

X_d Inductance de l'axe d

Pour un temps de réponse imposé, $\xi = 0.707$ nous obtenons les relations suivantes :

$$\omega_{0d} = \frac{1}{\sqrt{2}\tau_\sigma} \quad (109)$$

$$K_{id} = \frac{R_s \tau_{id}}{2\tau_\sigma} \quad (110)$$

Le schéma bloc de la boucle de régulation du courant i_q est donné par la Figure 4-18 [20].

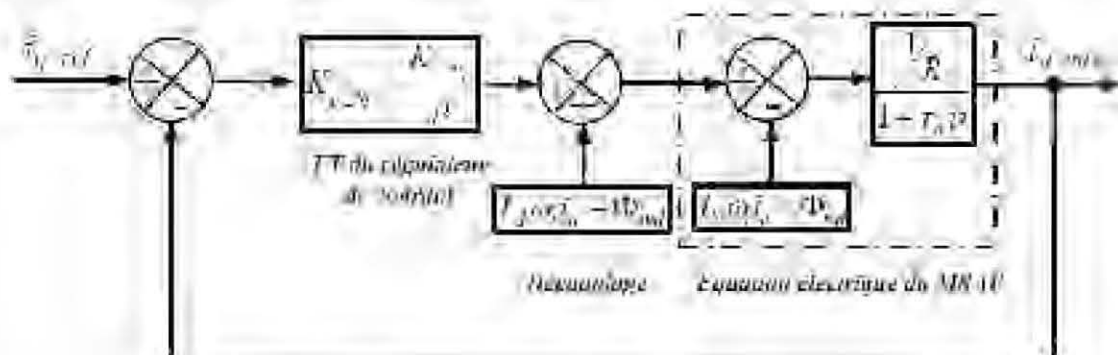


Figure 4-18 Schéma bloc de régulation du courant i_q

Le correcteur PI de courant selon l'axe d s'écrit sous la forme

$$C_q(p) = K_{iq} \frac{1 + \tau_{iq} p}{\tau_{iq} p} \quad (111)$$

De la même manière que pour l'axe d et en suivant le même cheminement nous obtenons la fonction de transfert en boucle fermée qui s'écrit de la sorte.

$$\frac{i_q(p)}{i_q^*(p)} = \frac{\omega_{0q}^2}{p^2 + 2\xi\omega_{0q}p + \omega_{0q}^2} \quad (112)$$

$$\text{Avec} \quad \omega_{0q}^2 = \frac{K_{iq}}{R_s \tau_{iq} \tau_a} \quad ; \quad \tau_a = T_d + T_{e-} \quad ; \quad \tau_{iq} = \frac{R_s}{K_{iq}}$$

$$\omega_{0q} = \frac{1}{\sqrt{2}\tau_a} \quad (113)$$

$$K_{iq} = \frac{R_s \tau_m}{2\tau_a} \quad (114)$$

Sachant que la fonction de transfert d'un régulateur PI s'écrit sous la forme

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (115)$$

En faisant une identification par rapport aux expressions précédemment développées (104) et (111), nous obtenons les relations suivantes :

$$\begin{aligned} K_{p-id} &= K_{id} \\ K_{i-id} &= \frac{K_{id}}{\tau_{id}} \end{aligned} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} K_{p-iq} &= K_{iq} \\ K_{i-iq} &= \frac{K_{iq}}{\tau_{iq}} \end{aligned} \quad (117)$$

4.2.4. Stratégie de commande du convertisseur de puissance

Les signaux parvenant depuis les systèmes de production d'énergie et de stockage contiennent plusieurs harmoniques. Pour y remédier, nous devons appliquer une commande sur le convertisseur de puissance, ainsi nous avons opté pour la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI plus connu sous le nom de PWM). Cette commande est très utilisée, son principe se base sur la logique de fonctionnement tout ou rien ou de façon plus générale fonctionnement à états discrets. Elle compare un signal de référence donné à une porteuse de forme triangulaire. Ce principe est illustré dans la *Figure 4-19*.

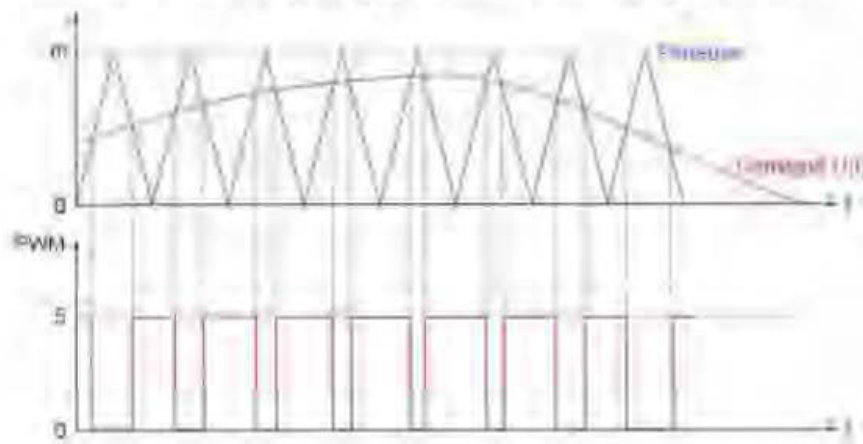


Figure 4-19 Principe de régulation de la commande MLI

La commande MLI sera appliquée sur l'onduleur du côté de la charge, le signal de référence sera dans ce cas de figure la tension comme le montre la *Figure 4-20*.

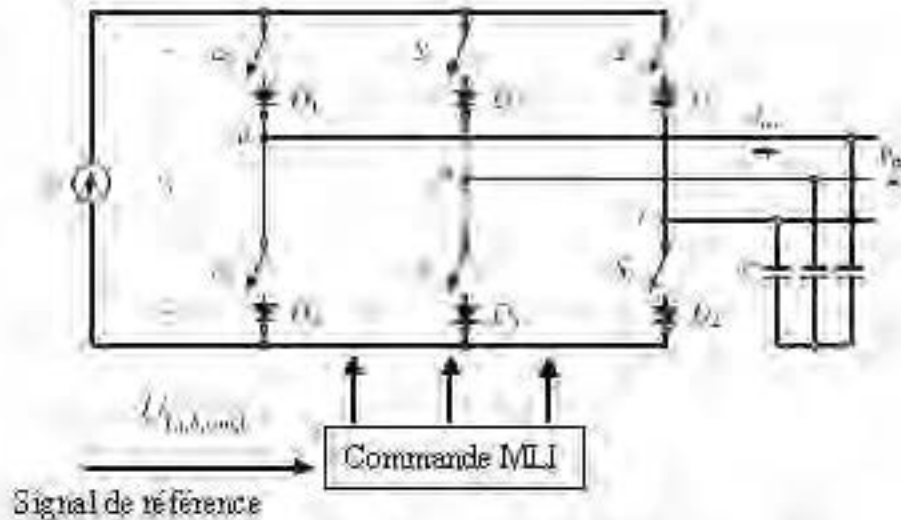


Figure 4-20 Application de la commande MLI sur un onduleur

La tension de référence ne varie pas de façon considérable lors d'une période d'échantillonnage de la MLI ce dont nous pouvons conclure que $f_{MLI} \gg f_{signal}$ [21].

Les tensions moyennes sur une période de la MLI peuvent être mises sous la forme :

$$v_{mi} = \frac{2}{T_{MLI}} \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \pi} U_{dc} dt = U_{dc} (1 - \alpha_i) \quad (118)$$

Ainsi nous déduisons $\alpha_i = \left(1 - \frac{v_{mi}}{U_{dc}} \right)$

En tenant compte des hypothèses suivantes [21] :

$$- \alpha_i \in [0, 1] \text{ et } u_{mi} \in [-1, 1]$$

$$f_{MLI} \gg f_{signal}$$

- En négligeant la variation du signal de référence u_{wa} entre deux intersections entre lui et la porteuse $\rightarrow \alpha_0 = (1 - u_{wa})$.

Nous pouvons ainsi écrire :

$$\begin{aligned} v_{m1} &= \frac{1}{2} U_{dc} (1 + u_{wa}) \\ v_{m2} &= \frac{1}{2} U_{dc} (1 + u_{wb}) \\ v_{m3} &= \frac{1}{2} U_{dc} (1 + u_{wc}) \end{aligned} \quad (119)$$

La loi des mailles nous permet aussi d'écrire les tensions triphasées sous la forme :

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{2}{3} v_{m1} - \frac{1}{3} v_{m2} - \frac{1}{3} v_{m3} \\ v_b &= \frac{2}{3} v_{m2} - \frac{1}{3} v_{m1} - \frac{1}{3} v_{m3} \\ v_c &= \frac{2}{3} v_{m3} - \frac{1}{3} v_{m2} - \frac{1}{3} v_{m1} \end{aligned} \quad (120)$$

Nous obtenons ainsi

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{pmatrix} u_{wa} \\ u_{wb} \\ u_{wc} \end{pmatrix} \quad (121)$$

Sachant que la loi de conservation de la puissance s'applique d'un côté comme de l'autre de l'onduleur nous pouvons écrire :

$$U_{dc} i_m = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (122)$$

$$i_m = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} i_a & i_b & i_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{wa} \\ u_{wb} \\ u_{wc} \end{pmatrix} \quad (123)$$

En passant par la transformation de Park, le modèle équivalent du système (convertisseur/onduleur) est présenté par la *Figure 4-21* [21].

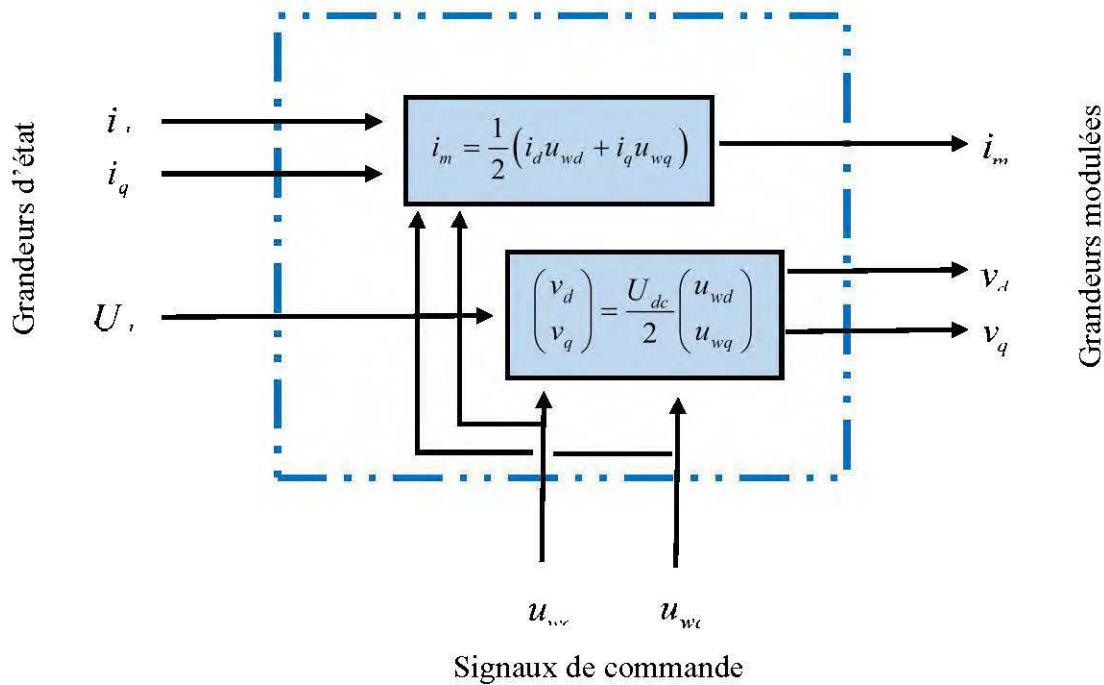


Figure 4-21 Modèle équivalent de la commande d'un onduleur

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré les différents composants qui servent à la conversion de puissance au niveau de l'aérogénérateur et du panneau photovoltaïque.

Avoir recours à l'onduleur est une étape importante pour aboutir à un jumelage entre les deux systèmes, car à partir de la sortie de celui-ci une transformation de Park est possible comme l'était le cas pour la GSAP et ainsi une simplification de l'étude et du contrôle par la suite.

Ayant démontré que le redresseur était contrôlable par une méthode simple, l'onduleur lui présente plus de difficulté et d'où le besoin d'avoir recours à la commande vectorielle qui assurera à travers des courants de références imposés le bon fonctionnement et l'obtention des meilleures performances possibles.

Chapitre 5

Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

Dans cette partie du travail, nous nous intéressons à la simulation du système global de jumelage en y implantant toutes les commandes et les systèmes de régulation précédemment discutés. Les simulations sont effectuées à l'aide de, l'extension du logiciel Matlab, Simulink.

, nous allons simuler l'éolienne et la génératrice synchrone montées sur une charge RL avec un redresseur, un bus DC, et un onduleur à commande MLI. Au niveau de l'éolienne un contrôle par MPPT et pitch angle seront utilisés pour réguler la puissance, la vitesse et le couple. Par la suite nous allons intégrer la commande vectorielle et visualiser l'effet que cela apportera sur le système.

Finalement nous effectuerons le jumelage des deux sources à savoir l'éolienne munie de la GSAP avec le panneau photovoltaïque en y ajoutant un système de stockage basé sur des batteries.

5.1. Modélisation de l'aérogénérateur avec la commande vectorielle, MLI et pitch angle Control

Dans cette partie, nous présentons la simulation simple du modèle éolien et de la génératrice synchrone à aimants permanents reliés à une charge (résistive/inductive). La commande MLI est appliquée du côté de la charge, du côté de l'aérogénérateur nous trouvons la commande vectorielle de la génératrice synchrone, dont le rôle est d'assurer une puissance réactive à la sortie de la génératrice, mais aussi la commande MPPT et la commande de l'angle d'inclinaison. Les paramètres de simulation pour les gains de la commande vectorielle sont donnés par le *Tableau 5-1*.

Tableau 5-1 Gains des correcteurs PI de la commande vectorielle

<i>Gain</i>	<i>Valeur</i>
K_{p_id}	-476.7124
K_{i_id}	-946.6
K_{p_iq}	-476.7124
K_{i_iq}	-946.6

La *Figure 5-1* montre l'évolution de la vitesse du vent et celle de l'angle d'inclinaison des pales de l'éolienne. La vitesse nominale de l'éolienne étant de 9 m/s, nous pouvons constater l'évolution de l'angle β , poussant ainsi l'éolienne à retourner à la valeur de fonctionnement nominale.

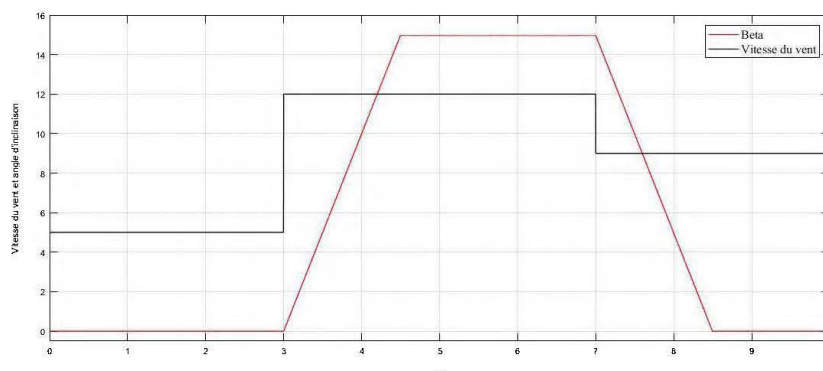


Figure 5-1 Evolution de la vitesse du vent et de l'angle d'inclinaison

La *Figure 5-2* représente l'évolution de la puissance active et réactive de la GSAP. Nous remarquons que pour la puissance active évolue suivant la vitesse du vent initiée. Pour la puissance réactive, nous pouvons estimer que les gains choisis sont optimaux, car nous voyons bien que la puissance réactive est quasiment nulle sur toute la durée de la simulation et que lors des phases de changement de vitesse, la régulation fait en sorte de rapidement la remettre à zéro.

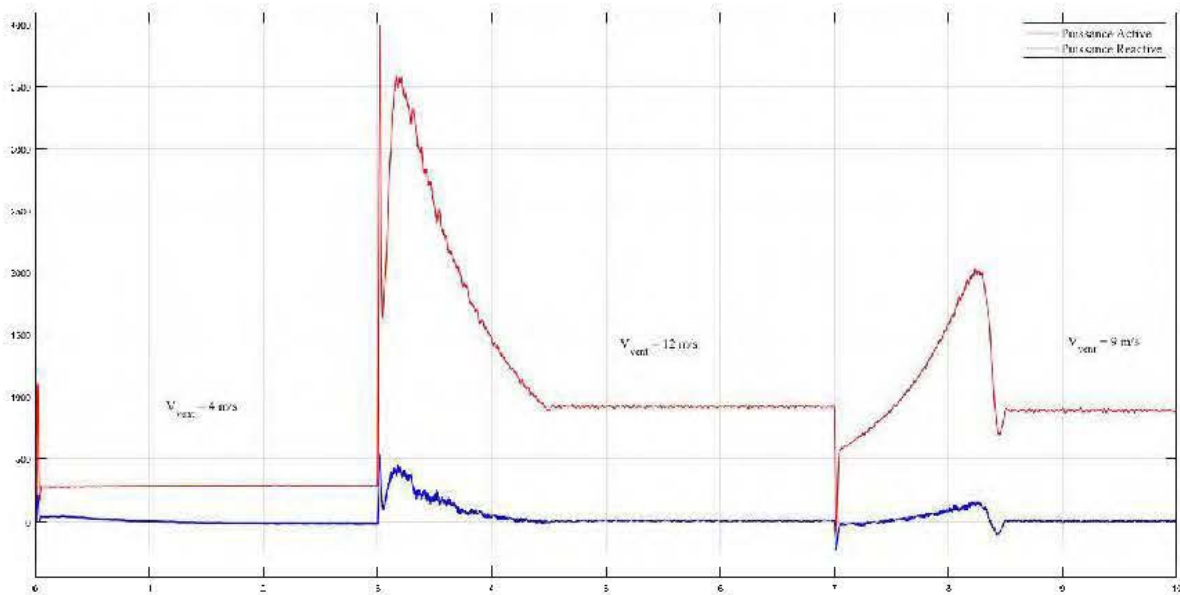


Figure 5-2 Evolution de la puissance active et réactive à la sortie de la GSAP

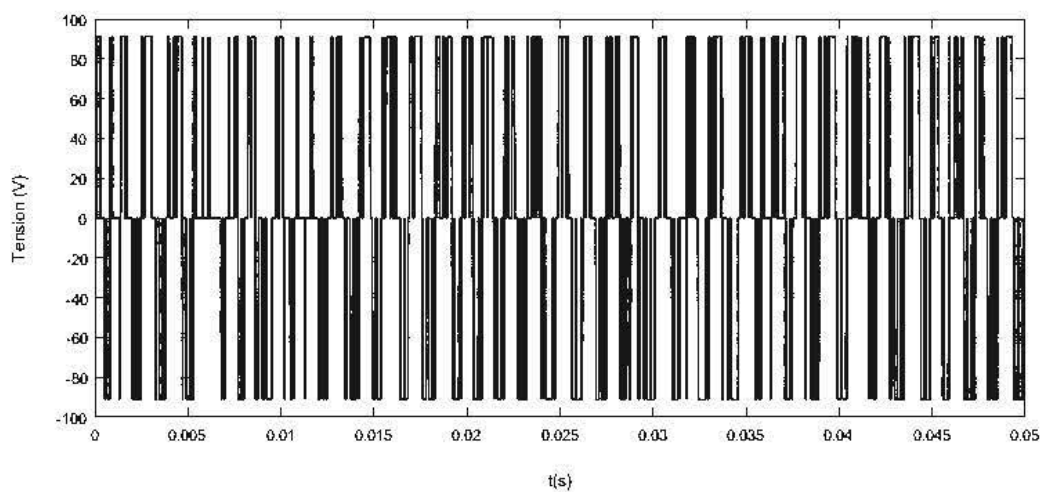


Figure 5-3 Tension de la commande MLI

5.2. Le Jumelage

Un système d'énergie alternative hybride peut être autonome ou connecté au réseau. Pour une application autonome, le système doit avoir une capacité de stockage suffisante pour gérer les variations de puissance des sources d'énergie alternatives impliquées. Ce système peut être considéré comme une micro-grille[22] avec ses propres sources de génération et charges, équipé d'interfaces d'électronique de puissance pour réguler la tension et la fréquence et assurer un partage de charge approprié entre les différentes sources. Pour un mode raccordé au réseau, les sources d'énergie alternatives dans la microgrille peuvent fournir de l'énergie tant aux charges locales qu'aux réseaux électriques. La capacité du dispositif de mémoire pour ces systèmes peut être plus petite si elles sont connectées au réseau, car la grille peut être utilisée comme une sauvegarde du système.

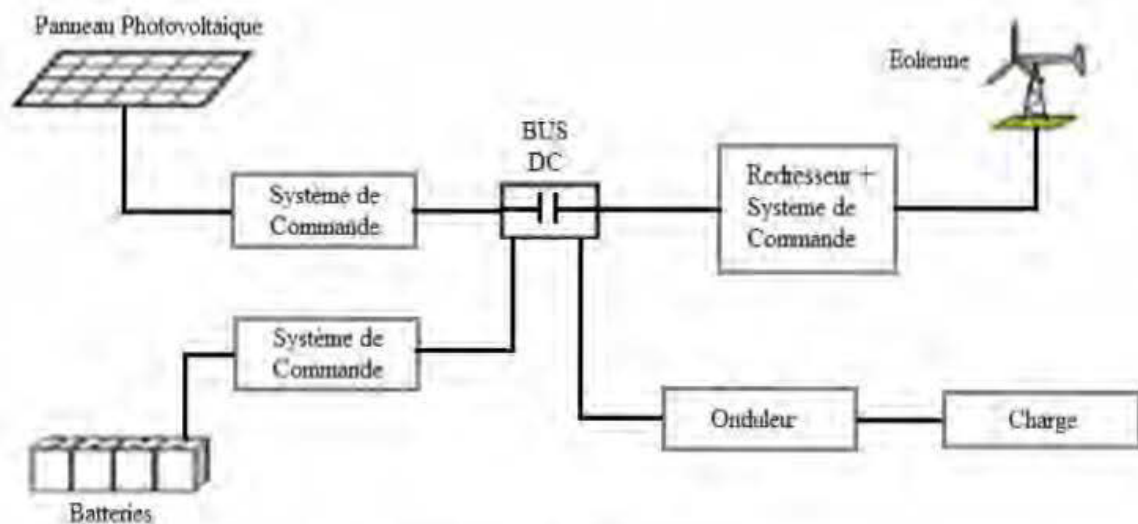


Figure 5-4 Modèle de jumelage

Cependant, lorsqu'elles sont connectées à un réseau électrique, des exigences importantes en matière de fonctionnement et de performances, telles que la tension, la fréquence et la réglementation des harmoniques, sont imposées au système. Des contrôleurs appropriés pour les applications connectées au réseau et autonomes sont en cours d'élaboration et de mise en œuvre dans des onduleurs, ce qui pourrait supporter le fonctionnement du système

hybride [23]. Plusieurs méthodes de jumelage se présentent, mais deux d'entre elles sont les plus utilisées à savoir un jumelage par bus DC ou de deux sources alternatives

En considérant l'aérogénérateur et le système photovoltaïque étant 2 sources de courant alternatif alimentant une charge. L'étude du jumelage sera en d'autres termes l'étude de l'effet de la source 2 sur la source 1 et le contrôle des puissances qui en sont délivrées, dans notre cas la charge est relative au réseau de distribution. Les contrôleurs des puissances actives partagées abaissent les fréquences angulaires $\omega 1$ et $\omega 2$ par rapport aux puissances actives de sorties $P1$ et $P2$ suivant certaines lois de commandes [24].

Le courant de sortie de l'aérogénérateur I_w et celui de sortie du panneau photovoltaïque I_{pv} se rejoignent via un BUS DC. Avant de se rejoindre, ces deux courants subissent des modifications au niveau des hacheurs pour s'assurer d'avoir la tension souhaitable en sortie. i_w est la somme des courants I_w et I_{pv} . En supposant un courant constant de sortie $i_w = C_{ste}$ l'étude de l'effet du module photovoltaïque sur l'aérogénérateur consiste à étudier l'effet d'une variation du courant I_{pv} sur le courant I_w [25].

- Contrôle et commande d'un système par régulateur PI

Sur la *Figure 5-2*, une stratégie de commande de puissance d'entrée de grille est proposée, sur la base de l'avance de puissance. La valeur de référence de l'amplitude du courant alternatif est obtenue à partir de la puissance de référence (P_{ref}) et de la valeur d'amplitude de la tension alternative (V_{CF_amp}) multipliée par la sortie sinusoïdale de référence PLL. En multipliant le résultat par la tension VCF passant par le PLL et la multiplication par $\sin(\theta)$ nous obtenons la référence du courant alternatif (i_o_ref) [25].

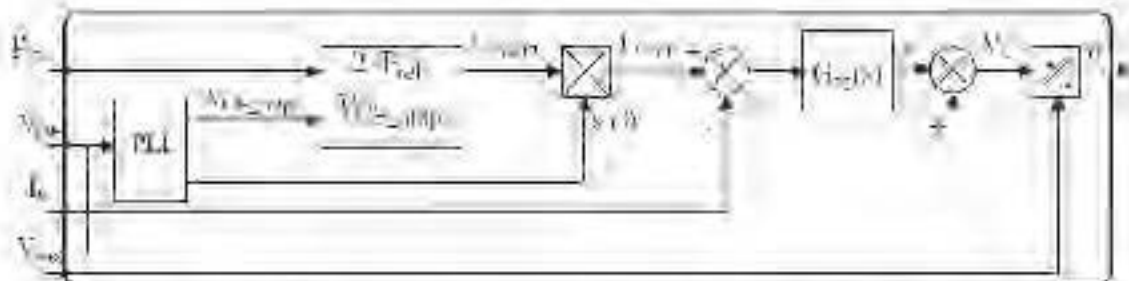


Figure 5-5 Structure de contrôle du mode opératoire d'un modèle relié au réseau

En mode de commande autonome, le système produit une tension de sortie sinusoïdale monophasée qui alimente toutes les charges. La structure de commande est représentée sur la *Figure 5-3* et elle se compose de boucles de régulation en cascade utilisées pour réguler le courant de charge dans la boucle interne et la tension de sortie dans la boucle externe.

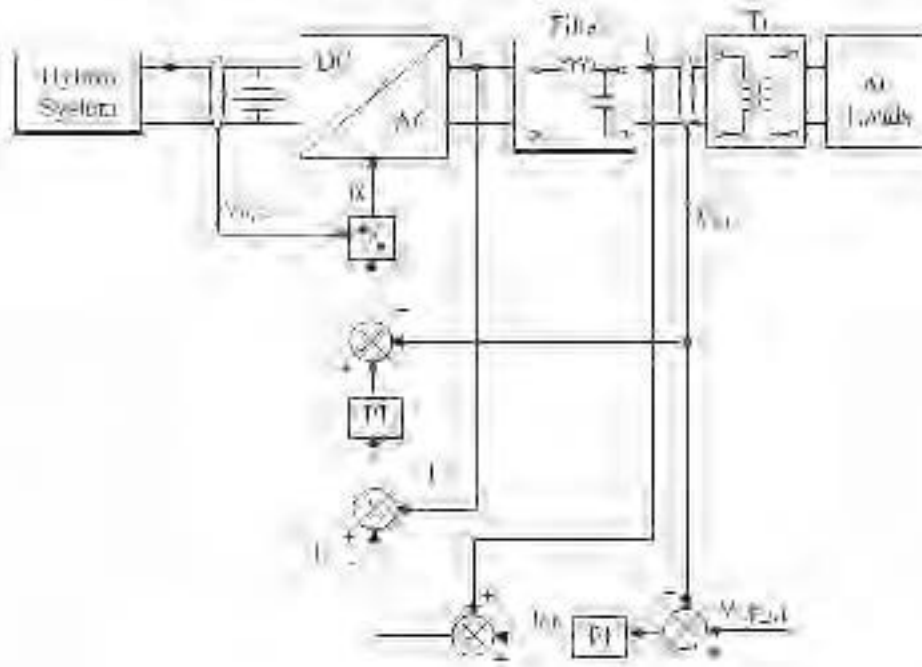


Figure 5-6 Structure de contrôle en mode autonome

Le contrôleur de tension de sortie vise à contrôler cette dernière avec une influence minimale de la forme des courants de charge non linéaires ou des transitoires de charge. Un régulateur PI standard fonctionnant en rotation synchrone est utilisé. Le régulateur PI maintient le courant de charge à la référence.

- Contrôle par Algorithme intelligent en y ajoutant d'autres composantes.

Le système global ne s'arrête pas à une éolienne et un panneau photovoltaïque, on y rajoute une pile à combustible et une ultra capacité. L'algorithme général est donné par la figure suivante [14].

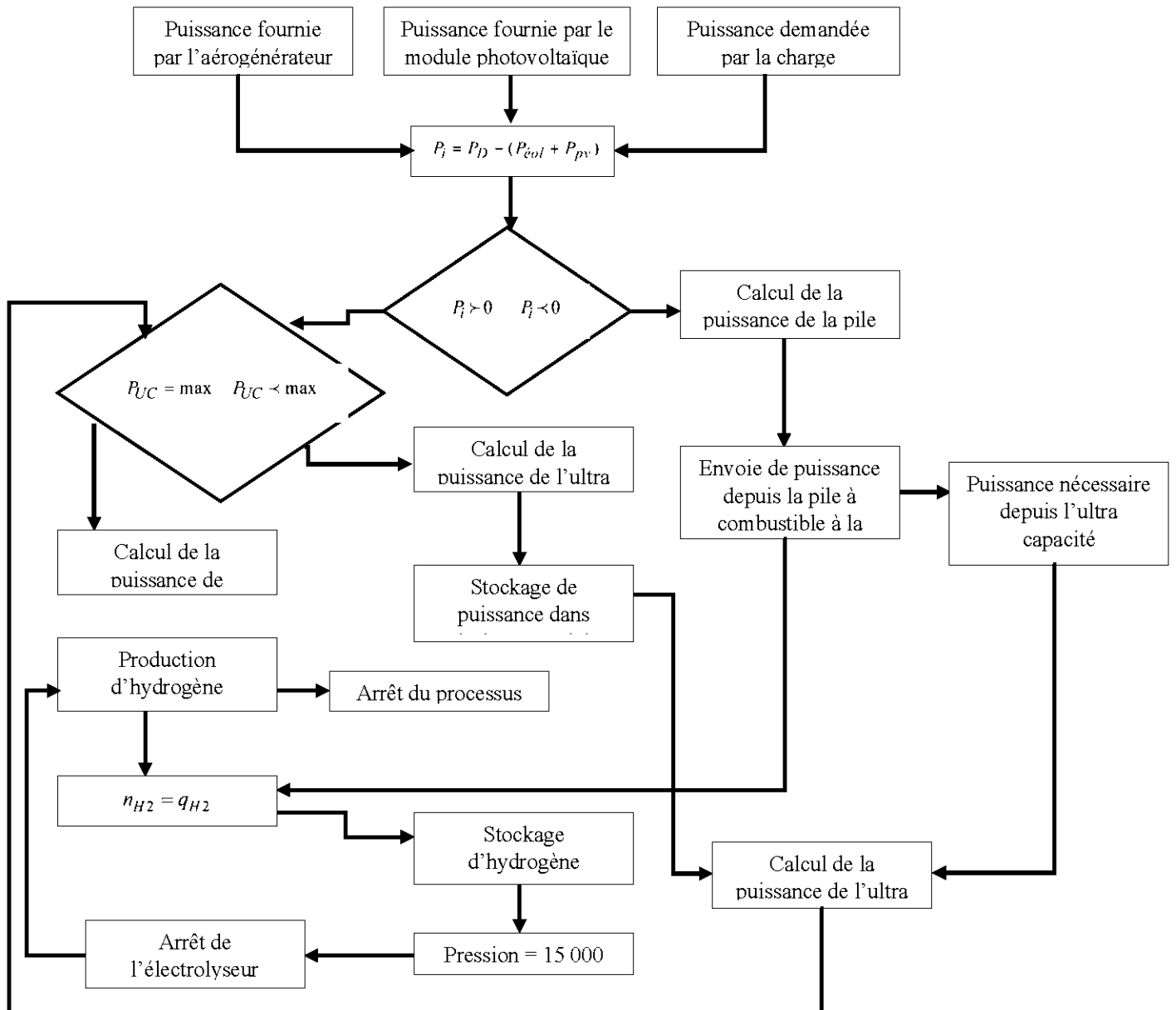


Figure 5-7 Algorithme utilisé par le contrôleur

5.3. Simulation

Dans cette partie, la simulation va s'accroître sur le jumelage d'un panneau photovoltaïque et d'une éolienne reliée sur une charge dynamique, les deux sources d'énergie sont soutenues par des batteries de stockage permettant ainsi de stocker et de délivrer de l'énergie au besoin, la *Figure 5-8* représente l'évolution des puissances respectives de l'aérogénérateur, du panneau photovoltaïque et des batteries ainsi que les puissances active et réactive reçues au niveau de la charge. Une fois le besoin comblé nous remarquons que la batterie se met en mode stockage comme sur la partition comprise entre le temps 0.5 s et 4 s. Ayant un besoin plus important ou une diminution au niveau de l'énergie produite les batteries fournissent l'énergie nécessaire pour combler le déficit comme nous le remarquons à partir de $t = 4$ s.

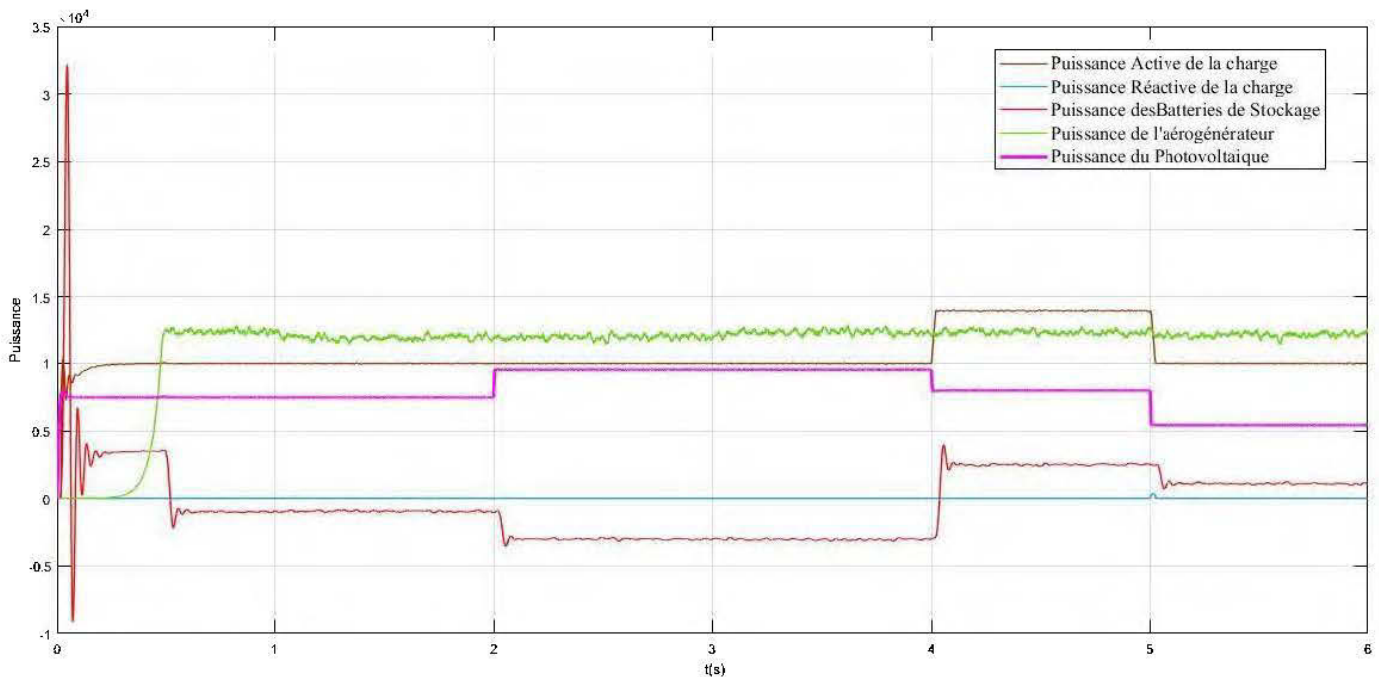


Figure 5-8 Evolution des puissances fournies et reçues

La *Figure 5-9* illustre les puissances active et réactive développées par la génératrice synchrone à aimants permanents, et nous pouvons constater que la puissance délivrée par l'aérogénérateur est totalement une puissance active, car la commande vectorielle maintient la puissance réactive nulle en tout temps.

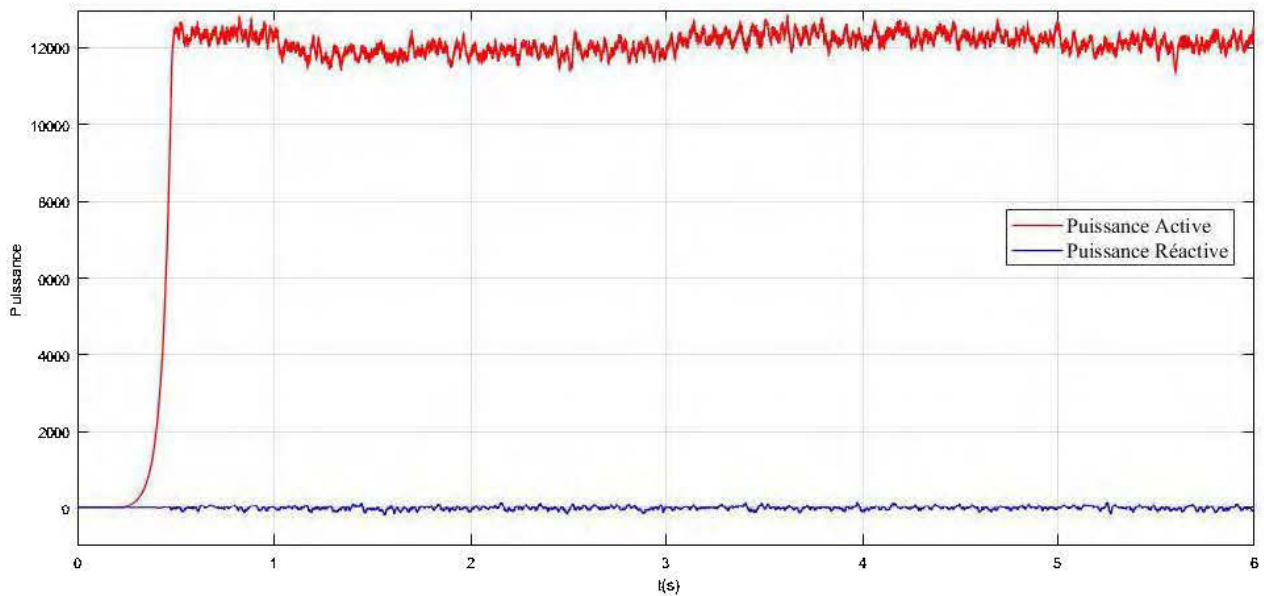


Figure 5-9 Evolution des puissances active et réactive à la sortie de la GSAP dans un système de jumelage

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé la notion du jumelage, parmi les méthodes préposées, le jumelage par bus DC reste le moyen le plus adapté de relier deux sources d'énergie pour l'alimentation d'une charge isolée.

Nous avons aussi validé le bon fonctionnement des commandes proposées dans le chapitre précédent et ainsi avoir un fonctionnement optimal du système global.

Nous avons remarqué que le bon choix des équipements est primordial pour que le jumelage fonctionne parfaitement, car si le système de stockage par exemple n'arrive pas à suivre l'évolution de la puissance en terme de la fournie et reçue, il y aura soit de l'énergie en plus gaspillée ou que les batteries en question n'arrivent pas à couvrir le déficit d'énergie. La simulation étant faite sur une courte durée de temps pour des raisons de rapidité de résolution, divers scénarios restent possibles à explorer.

Conclusion générale

Ce travail aborde la modélisation d'un système de jumelage éolien/photovoltaïque. Cette étude ne se limite pas à relier deux systèmes entre eux, mais plutôt à trouver le juste équilibre de fonctionnement et la coordination entre les divers équipements constituant le système global servant par la suite à l'alimentation d'une charge isolée.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord situé le travail dans un contexte socio-économique général, permettant ainsi de voir les avantages et les inconvénients, les plus et les lacunes des énergies renouvelables. Par la suite, nous avons abordé la modélisation des divers composants à commencer par l'éolienne puis le module photovoltaïque par la suite nous avons modélisé la génératrice synchrone et nous avons terminé par le modèle global en passant par les diverses techniques de contrôle et les équipements de conversion de puissance.

Une grande partie du travail a été effectuée par simulation numérique en ayant recours aux logiciels Matlab et Matlab/Simulink, ceci est notamment dû au fait qu'il n'est pas possible d'avoir à portée les équipements nécessaires. L'étude des éoliennes et des panneaux photovoltaïques a été effectuée d'un point de vue électrique et mécanique, ceci a permis d'analyser les performances de ces systèmes et de voir l'importance qu'il faut accorder au niveau de la commande qui a été bien détaillée dans le chapitre 4. Mais une partie a été modélisée théoriquement et validée expérimentalement qui est la génératrice synchrone à aimants permanents et dont les résultats obtenus sont très concluants et sont sujettes de rédaction d'un article scientifique.

Ayant réussi à modéliser le système de jumelage cela reste encore incomplet, par manque de temps nous n'avons pas pu pousser un peu plus loin le contexte de l'étude.

Comme travaux à venir, nous envisageons d'approfondir l'étude des régimes turbulents sur le mécanisme éolien en effectuant des simulations sur des logiciels adéquats tels qu'Ansys CFX, car contrairement aux hypothèses de travail utilisées, à partir d'une vitesse de 1.8 m/s l'éolienne subit déjà un régime d'écoulement turbulent. Nous envisageons aussi de développer d'autres modèles de commande et trouver le meilleur modèle offrant à la fois une bonne stabilité et une vitesse de réponse tels que les commandes à logique floue ou les commandes à réseau de neurones.

Bibliographie

- [1] Jean Claude Sabonnadière, << Nouvelles technologies de l'énergie 1 >>, Lavoisier, 2006
- [2] <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>
- [3] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, << Eolienne >>, Techniques de l'Ingénieur, BM 4640.
- [4] Tommy Andy Theubou Tameghe << Modélisation et Simulation d'un système de jumelage Eolien-Diesel alimentant une charge locale>>, L'université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Maitrise en ingénierie, Aout 2012
- [5] A. Pigazo, Z. Qin, M. Liserre et F. Blaabjerg, "Generation of random wind speed profiles for evaluation of stress in WT power converters," dans Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2013 International Conference on, 2013, pp. 436-441.
- [6] I. G. Damousis, M. C. Alexiadis, J. B. Theocharis et P. S. Dokopoulos, "A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 352-361, 2004.
- [7] « TP énergie solaire » UPMC
- [8] Mansour Assani Dahouenon << le manuel du technicien photovoltaïque >> Publication PREDACO 2011
- [9] <http://pvpmc.org/modeling-steps/>
- [10] Nicolas Laverdure << Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires >> Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005.

- [11] A. Boyette, << Contrôle – commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [12] A. Mirecki, << Étude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance >>, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [13] S. El Aimani, << Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d’Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [14] <http://fr.wikipedia.org/>
- [15] M. Adouane, M. Haddadi, A. Malek et M. Hadjiat << Étude et conception d’un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC 16F876A >> Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 543 – 550
- [16] MUHAMMAD H. RASHID << POWER ELECTRONICS HANDBOOK>> ACADEMIC PRESS, A Harcourt Science and Technology Company, 2001
- [17] V, Courtecuisse, « Supervision d’une centrale multi source à base d’éoliennes et de stockage d’énergie connectée au réseau électrique ». Thèse Doctorat de l’école nationale supérieure d’arts et métiers, 20 Novembre 2008.
- [18] Busca, C., Stan, A. I., Stanciu, T., & Stroe, D. I. (2010, July). Control of permanent magnet synchronous generator for large wind turbines. In Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on (pp. 3871-3876). IEEE.
- [19] Abdullah, M. A., Yatim, A. H. M., Tan, C. W., & Saidur, R. (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. Renewable and sustainable energy reviews, 16(5), 3220-3227.
- [20] A. KHLAIEF << Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)>> thèse de Doctorat en Génie Electrique et Automatisme, Université de Aix-Marseille, 2012

- [21] T. ZIDELMAL << Modèle De Prédiction Et De Commande De La Machine Synchrone À Aimants Permanents : Application Dans Les Aérogénérateurs>> Maitrise en Ingénierie en génie électrique, UQAT, 2015
- [22] R. H. Lasseter, « Microgrids, » dans Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, 2002, pp. 305-308.
- [23] A. Roth-Deblon, "Combined DC and AC integration of energy sources in hybrid 3-phase off-grid systems," dans *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, pp. 2431-2433.
- [24] C. K. Sao et P. W. Lehn, "Autonomous load sharing of voltage source converters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1009-1016, 2005.
- [25] M. Dali, J. Belhadj et X. Roboam, « Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management–experimental investigation," *Energy*, vol. 35, pp. 2587-2595, 2010.
- [26] O. Onar, M. Uzunoglu et M. Alam, "Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system," *Journal of Power Sources*, vol. 185, pp. 1273-1283, 2008.
- [27] http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/1000/1824/wind_speed_climatolog_v.jpg
- [28] "World Energy Outlook ", International Energy Agency (IEA), OECD/IEA, 2008.
- [29] <https://www.energieplus-lesite.be>
- [30] <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-solar-panel-wind-power-generation-system-home-infographic-simplified-diagram-off-grid-turbine-image91196127>

Annexe 1

	albédo
environnement urbain (Urban environment)	0,14 - 0,22
Herbe (Grass)	0,15 - 0,25
Herbe fraîche (Fresh grass)	0,26
Neige fraîche (Fresh snow)	0,82
Neige humide (Wet snow)	0,55 - 0,75
Asphalte sec (Dry asphalt)	0,09 - 0,15
Asphalte humide (Wet Asphalt)	0,18
Béton (Concrete)	0,25 - 0,35
Tuiles rouges (Red tiles)	0,33
Aluminium (Aluminum)	0,85
Cuivre (Copper)	0,74
Acier galvanisé neuf (New galvanized steel)	0,35
Acier galvanisé très sale (Very dirty galvanized steel)	0,08

Annexe 2 Définition des matrices du Chapitre 3

Définition des matrices

Dans ce paragraphe nous définissons l'ensemble des matrices et des paramètres généraux d'une machine synchrone à aimant permanent.

$[R_s]$: Matrice diagonale des résistances statorique

$[R_r]$: Matrice diagonale des résistances rotorique

$[L_{rr}]$: Matrice inductance du rotor

$[L_{ss}]$: Matrice inductance du stator

$[M_{rs}]$: Matrice mutuelle rotor-stator : influence du stator sur le rotor

$[M_{sr}]$: Matrice mutuelle stator-rotor : influence du rotor sur le stator

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & L_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$$

Où on a :

$$L_a = L_{so} + L_{sv} \cdot \cos(2 \cdot p \cdot \theta) : \text{Inductance propre de la phase a}$$

$$L_b = L_{so} + L_{sv} \cdot \cos\left(2 \cdot p \cdot \theta + \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance propre de la phase b}$$

$$L_c = L_{so} + L_{sv} \cdot \cos\left(2 \cdot p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance propre de la phase c}$$

$$M_{ab} = M_{so} + L_{sv} \cdot \cos\left(2 \cdot p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre les phases a et b}$$

$$M_{ab} = M_{so} + L_{sv} \cdot \cos(2 \cdot p \cdot \theta) : \text{Inductance mutuelle entre les phases b et c}$$

$$M_{ab} = M_{so} + L_{sv} \cdot \cos\left(2 \cdot p \cdot \theta + \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre les phases a et c}$$

$$M_{af} = M_{fs} \cdot \cos(p \cdot \theta) : \text{Inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase a}$$

$$M_{bf} = M_{fs} \cdot \cos\left(p \cdot \theta + \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase b}$$

$$M_{cf} = M_{fs} \cdot \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase c}$$

$$M_{aD} = M_{sD} \cdot \cos(p \cdot \theta) : \text{Inductance mutuelle entre l'amortisseur D et la phase a}$$

$$M_{bD} = M_{sD} \cdot \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre l'amortisseur D et la phase b}$$

$$M_{cD} = M_{sD} \cdot \cos\left(p \cdot \theta + \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre l'amortisseur D et la phase c}$$

$$M_{aQ} = -M_{sQ} \cdot \sin(p \cdot \theta) : \text{Inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et la phase a}$$

$$M_{bQ} = -M_{sQ} \cdot \sin\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et la phase b}$$

$$M_{cQ} = -M_{sQ} \cdot \sin\left(p \cdot \theta + \frac{2\pi}{3}\right) : \text{Inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et la phase c}$$

L_f : Inductance propre de l'inducteur

L_D : Inductance propre de l'amortisseur D

L_Q : Inductance propre de l'amortisseur Q

M_{fD} : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur D

M_{fQ} : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur Q ; $M_{fQ} = 0$

M_{DQ} : Inductance mutuelle entre les 2 amortisseurs ; $M_{DQ} = 0$

$$M_{so} = -\frac{L_{so}}{2} \text{ Valable en négligeant les flux de fuites}$$

$$\{L_{so}; L_{sv}; L_f; L_D; L_Q; M_{fs}; M_{sD}; M_{sQ}; M_{fD}\} \in \mathbb{R}_+^*$$

Si la machine est de constitution symétrique au rotor (ce qui est généralement le cas) on a :

$$L_D = L_Q \quad \& \quad R_D = R_Q$$

$$L_{cs} = L_{so} - M_{so} = \frac{3}{2} L_{so} : \text{Inductance cyclique d'une phase du stator}$$

$$L_{os} = L_{so} + 2M_{so} = 0 : \text{Inductance homopolaire d'une phase du stator}$$

$$L_d = L_{cs} + \frac{3}{2} L_{sv} : \text{Inductance d'axe direct}$$

$$L_q = L_{cs} - \frac{3}{2} L_{sv} : \text{Inductance d'axe quadratique}$$

$$M_{fd} = \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} : \text{Inductance mutuelle entre f et d}$$

$$M_{dD} = \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sD} : \text{Inductance mutuelle entre d et D}$$

$$M_{qQ} = \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sQ} : \text{Inductance mutuelle entre q et Q}$$

$$M_{dq} = \begin{bmatrix} M_{fd} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & M_{qQ} \end{bmatrix} : \text{Matrice des mutuelles inductances}$$

$$[P_{32}(\xi)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\xi) & -\sin(\xi) \\ \cos\left(\xi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\xi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\xi + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\xi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

$$[C_{32}] \cdot [C_{32}]^T = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

$$[L_{sv}] = L_{sv} \cdot \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2p\theta) \\ \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$[L_{so}] = \begin{bmatrix} L_{so} & M_{so} & M_{so} \\ M_{so} & L_{so} & M_{so} \\ M_{so} & M_{so} & L_{so} \end{bmatrix}$$

Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents

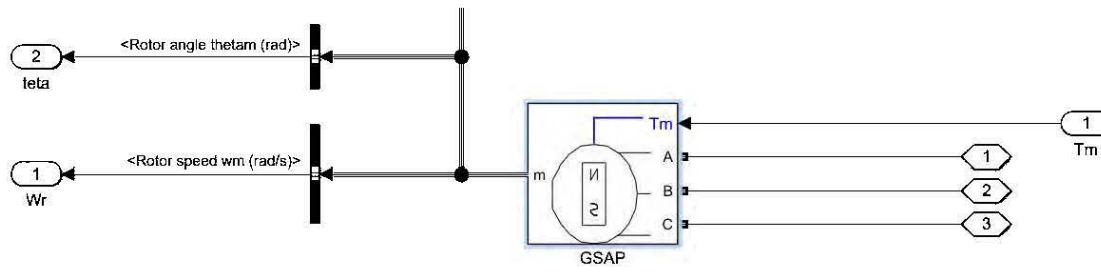


Schéma bloc de l'aérogénérateur relié à un onduleur juste avant la charge

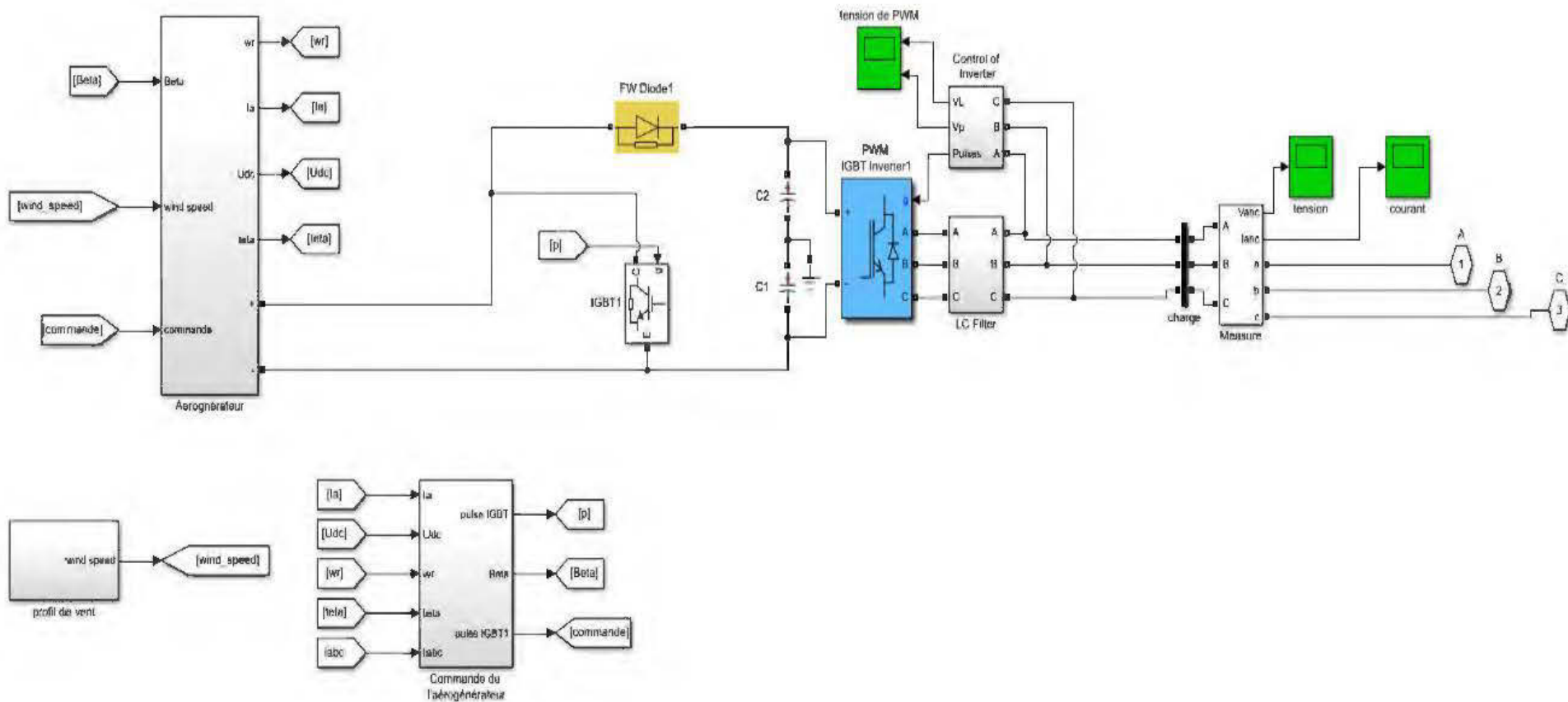


Schéma bloc de l'aérogénérateur

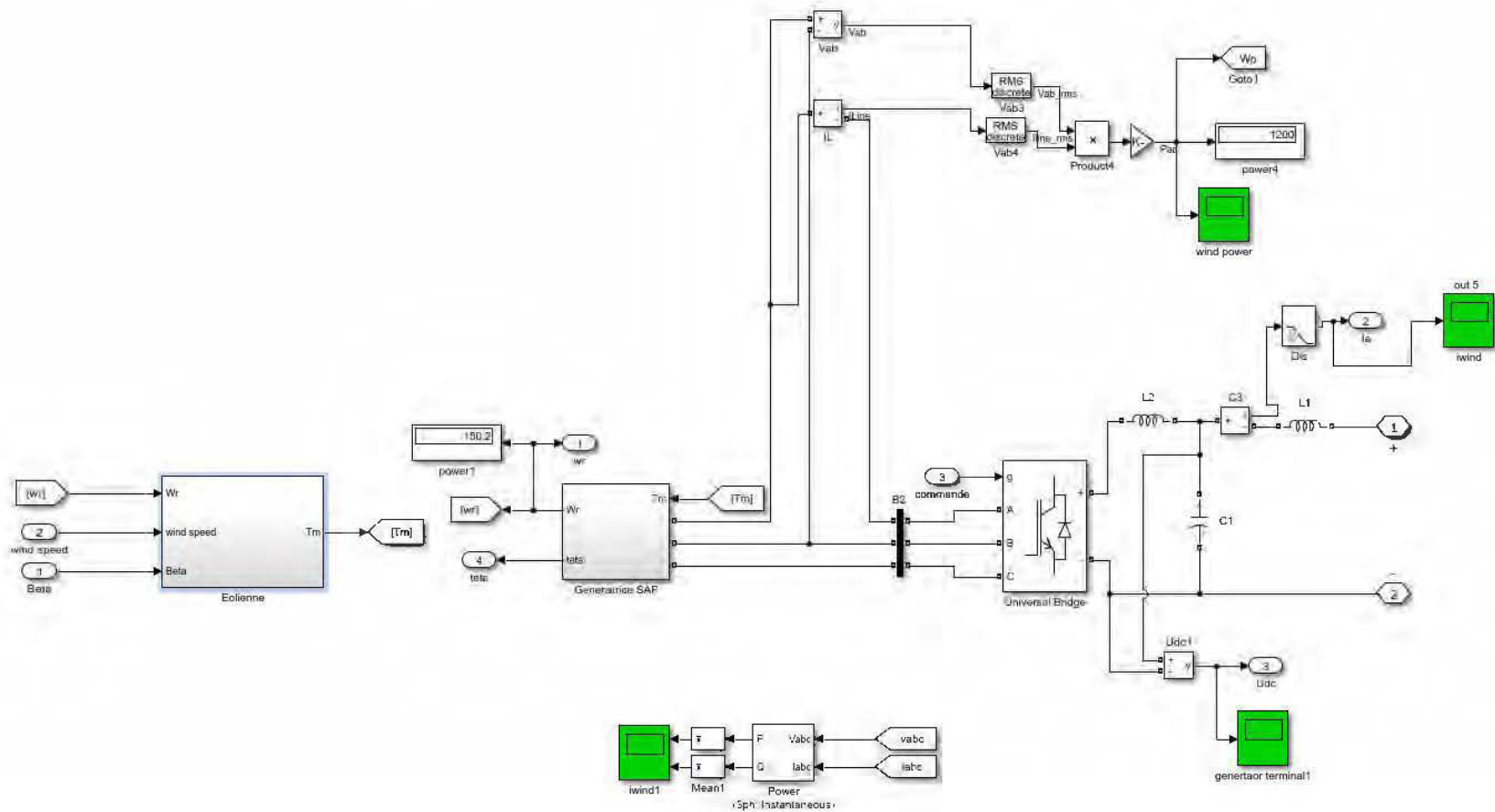


Schéma Bloc de la Commande (Commande vectorielle, pitch angle control et MPPT)

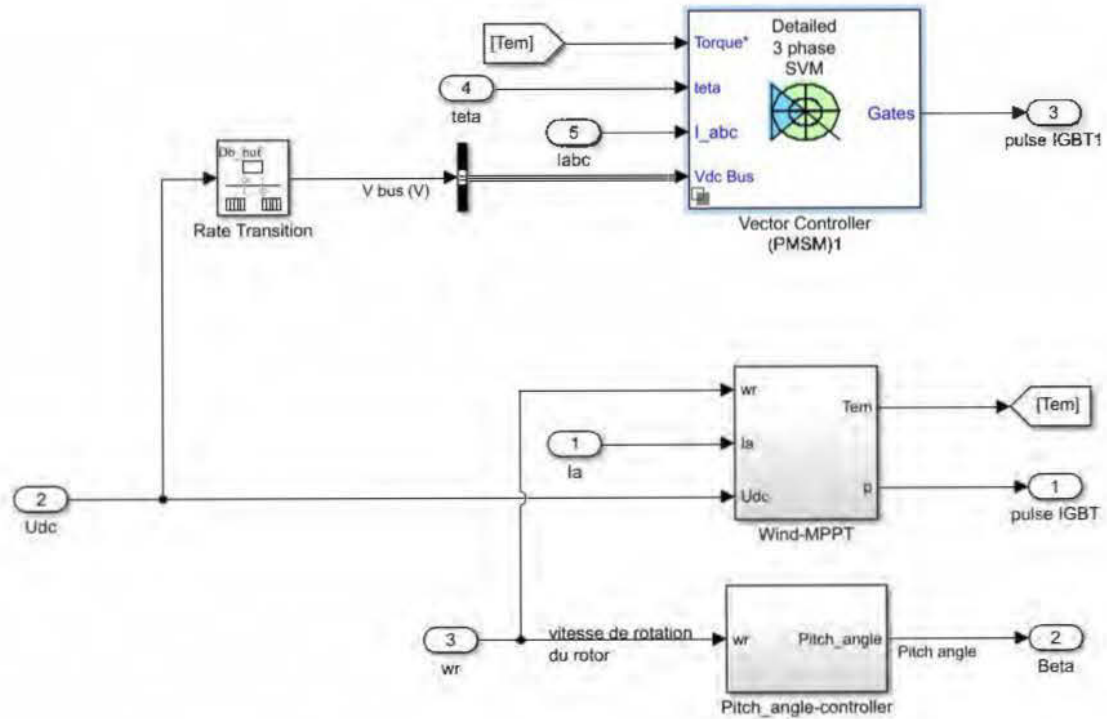


Schéma bloc de la commande MLI

