

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : **Electrotechnique**  
Spécialité : **Energie et environnement**

Présenté par :  
**CHATER Alya**

Thème

# Etude et contrôle d'un système hybride éolien-photovoltaïque

Soutenu publiquement, le 06 / 07 / 2022, devant le jury composé de :

Mr F.Boukli Hacène	Pr	ESSA. Tlemcen	Président
Mr M. Mebrouki	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr D.Bendaoud	Ingénieur de production	SPE/PPO/Oran	Co- Directeur de mémoire
Mr A.Kerboua	MCB	ESSA. Tlemcen	Examinateur
Mme. D. Kherbouche	MCA	ESSA. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2021/2022



---

# REMERCIEMENT

*Comme chaque étudiant, je suis passée par des hauts et des bas au cours de mon cursus. Alors, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mes études et mon projet de fin d'étude et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Je voudrais dans un premier temps remercier mon encadrant Mr Mohamed MEBROUKI et Mr Djilali BENDAOUED pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Aussi tous les professeurs au sein de l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen qui ont tellement ajouté à mes compétences personnelles autant que professionnelles et qui j'avais un énorme plaisir d'être leur étudiante, citant parmi eux Mr Mohammed MESSIRDI.*

*Je désire aussi remercier Mme Soumia DJERABA ingénieur en électrotechnique, pour son aide et son orientation tout le long de la réalisation de ce modeste mémoire*

*Alya CHATER*



---

# DEDICACE

À mon très cher père, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension et Ton soutien qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. merci d'être toujours là papa.

À ma très chère mère, tu es la chose la plus précieuse au monde pour moi, Aucune dédicace ne peut exprimer tout mon amour et ma gratitude, merci pour ton encouragement, ton amour, ton soutien et tes sacrifices, merci d'être toujours à mes cotée mama.

À mes très chères sœurs, Bouchra, Dalila et Imene, Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

À mes petits adorables Mirale, Meriem, Yanis et Yahya vous avez apporté du bonheur à ma vie, mon monde sans vous serait sans saveur.

À chères Yasmine, Wafaa, Amani, Imen, Ghezlane. , Je ne trouve pas les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes sentiments. Merci d'être les amies sur lesquelles je peux compter.

À mon cher ami Ahmida, en témoignage de l'amitié qui nous unit et en souvenir de tous les moments passés ensemble, je te dis merci pour tout ce que tu m'avais fait et je te souhaite du succès et du bonheur.

À tout mes amis, Karim, Amine ABID, Amine GHENIM,

*Alya Chater*

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Remerciment</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>viii</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>x</b>
<b>1 Généralité sur les systèmes éolien-photovoltaïque</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	2
1.2 Généralités sur les systèmes éoliens . . . . .	2
1.2.1 Histoire de l'énergie éolienne . . . . .	2
1.2.2 Origine du vent . . . . .	3
1.2.3 Présentation du système éolien . . . . .	5
1.2.4 Principe de fonctionnement . . . . .	8
1.2.5 Structure d'une éolienne . . . . .	9
1.2.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne . . . . .	10
1.2.7 Générateur électrique . . . . .	11
1.3 Généralités sur les systèmes photovoltaïques . . . . .	15
1.3.1 Survol historique . . . . .	15
1.3.2 Généralités sur le soleil et le rayonnement solaire . . . . .	16
1.3.3 Coordonnées géographiques terrestres . . . . .	18
1.3.4 Énergie photovoltaïque . . . . .	19
1.3.5 Cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement . . . . .	22
1.3.6 Types de cellules photovoltaïques . . . . .	23
1.3.7 Module photovoltaïque : . . . . .	25
1.3.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque . . . . .	26
1.4 Problématique et objectif . . . . .	27
1.4.1 Problématique . . . . .	27
1.4.2 Objectif . . . . .	27
1.5 Conclusion . . . . .	27

<b>2</b>	<b>Modélisation des systèmes photovoltaïque et éolien</b>	<b>29</b>
2.1	Introduction . . . . .	29
2.2	Partie photovoltaïque . . . . .	29
2.2.1	Modèle électrique et mathématique de la cellule PV : . . . . .	29
2.2.2	Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque . . . . .	31
2.2.3	Hacheur parallèle ( Boost) : . . . . .	33
2.2.4	Principe de la commande MPPT avec un régulateur itératif ( <i>P&amp;O</i> ) : . . . . .	36
2.2.5	Caractéristique du GPV . . . . .	37
2.2.6	Résultats de simulation . . . . .	40
2.2.7	Interprétation des résultats . . . . .	44
2.3	Partie éolienne . . . . .	44
2.3.1	Modélisation de la turbine . . . . .	44
2.3.2	Modélisation du multiplicateur . . . . .	45
2.3.3	Modélisation de l'arbre . . . . .	46
2.3.4	Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable . . . . .	46
2.3.5	Technique d'extraction du maximum de puissance . . . . .	47
2.3.6	Commande MPPT avec asservissement de vitesse . . . . .	48
2.3.7	Modélisation de la MADA : . . . . .	50
2.3.8	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation . . . . .	51
2.3.9	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique . . . . .	57
2.3.10	Commande directe des puissances active et réactive . . . . .	60
2.3.11	Résultat de la simulation . . . . .	63
2.4	Conclusion . . . . .	66
<b>3</b>	<b>Contrôle d'un système hybride</b>	
	<b>éolien-photovoltaïque</b>	<b>67</b>
3.1	Introduction . . . . .	67
3.2	Généralités sur le système hybride . . . . .	67
3.2.1	Définition du système hybride . . . . .	67
3.2.2	Principaux composants du système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque	68
3.3	Avantages et inconvénients du système hybride . . . . .	68
3.3.1	Avantages . . . . .	68
3.3.2	Inconvénients . . . . .	68
3.4	Configuration du système hybride . . . . .	68
3.4.1	Architecture à bus courant continu (CC) . . . . .	69
3.4.2	Architecture à bus courant alternatif (CA) . . . . .	69

3.4.3	Architecture à bus mixte CC/CA . . . . .	69
3.5	Classification des systèmes hybrides selon le régime de fonctionnement . . . . .	70
3.6	Système du stockage . . . . .	70
3.7	Convertisseurs . . . . .	70
3.8	Résultats de simulation . . . . .	71
3.8.1	Interprétations des résultats . . . . .	73
3.9	Conclusion . . . . .	74
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>77</b>
<b>ANNEXES</b>		<b>81</b>
A.1	Theorie de Betz . . . . .	81
A.2	Transformation de park . . . . .	82
A.3	Orientation du flux statorique . . . . .	83
<b>ANNEXES</b>		<b>85</b>
A.1	La chaine éolienne . . . . .	85
A.1.1	La turbine éolienne . . . . .	86
A.1.2	La génératrice à double alimentation . . . . .	86
A.1.3	Commande de l'onduleur . . . . .	87
A.2	La chaine photovoltaïque . . . . .	88
A.2.1	Hacheur boost . . . . .	88
A.2.2	La commande MPPT . . . . .	89



---

# LISTE DES FIGURES

1.1	Histoire de l'énergie éolienne . . . . .	4
1.2	La chaîne de conversion d'une éolienne . . . . .	6
1.3	Les éoliennes à axe horizontal . . . . .	7
1.4	Les éoliennes a axe verticale . . . . .	8
1.5	Structure d'une éolienne . . . . .	10
1.6	Éolienne à base d'une machine asynchrone a cage d'écureuil . . . . .	13
1.7	Éolienne à base d'une machine asynchrone a double alimentation . . . . .	14
1.8	Éolienne à base d'une machine synchrone . . . . .	14
1.9	les différents types du rayonnement solaire . . . . .	17
1.10	La latitude et la longitude . . . . .	18
1.11	La déclinaison . . . . .	19
1.12	Hauteur et azimut . . . . .	20
1.13	Dopage de type N . . . . .	21
1.14	Dopage de type P . . . . .	21
1.15	Jonction PN . . . . .	22
1.16	Principe de fonctionnement d'une cellule PV . . . . .	23
1.17	Cellule monocristalline . . . . .	24
1.18	Cellule polycristalline . . . . .	24
1.19	Cellule amorphe . . . . .	25
1.20	La formation d'un système photovoltaïque a partir d'une cellule . . . . .	26
2.1	Modèle électrique de la cellule PV . . . . .	30
2.2	Caractéristique courant-tension . . . . .	31
2.3	Schéma électrique du hacheur Boost . . . . .	34
2.4	Signal de commande des interrupteurs . . . . .	35
2.5	Principe du MPPT pour le système solaire photovoltaïque . . . . .	36
2.6	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation . . . . .	37
2.7	Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque . . . . .	38
2.8	Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du module photovoltaïque . . . . .	39

2.9	Les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du module photovoltaïque . . . . .	40
2.10	Allure de tension du système PV en fonction du temps . . . . .	41
2.11	Allure du courant du système PV en fonction du temps . . . . .	41
2.12	Allure des puissances en fonction du temps . . . . .	41
2.13	Allure de variation de l'éclairement . . . . .	42
2.14	Allure de la tension du système PV à éclairement variable . . . . .	42
2.15	Allure du courant à éclairement variable . . . . .	42
2.16	Allure de variation de température . . . . .	43
2.17	Allure de tension à température variable . . . . .	43
2.18	Allure du courant à température variable . . . . .	43
2.19	Modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine . . . . .	46
2.20	Les zones de fonctionnement . . . . .	47
2.21	Schéma bloc de la commande avec asservissement de la vitesse . . . . .	49
2.22	Schéma fonctionnel du régulateur PI [Kel-11] . . . . .	50
2.23	Caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [Dje,Mel-20] . . . . .	51
2.24	Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA [Kra-13] . . . . .	52
2.25	Modèle simplifié des courants rotoriques de la MADA . . . . .	58
2.26	Modèle simplifié des puissances statoriques de la MADA . . . . .	59
2.27	Modèle réduit du rotor de la MADA . . . . .	60
2.28	Modèle de la commande directe des puissances de la MADA [Dje,Mel-20] . . . . .	61
2.29	Schéma de régulation des puissances $P_s$ et $Q_s$ . . . . .	61
2.30	Allure du profil du vent . . . . .	63
2.31	Allure de la puissance statorique active . . . . .	64
2.32	Allure de la puissance statorique réactive . . . . .	64
2.33	Allure des courants rotorique . . . . .	64
2.34	Allure du courant statorique réel . . . . .	65
2.35	Allure du courant rotorique réel . . . . .	65
2.36	Allure de la vitesse électrique . . . . .	66
3.1	Allure de la tension du système hybride . . . . .	72
3.2	Allure du courant du système hybride . . . . .	72
3.3	Allure de la tension de sortie de l'onduleur . . . . .	72
3.4	Allure du courant de sortie de l'onduleur . . . . .	73
3.5	Allure de la puissance du système hybride . . . . .	73
A.1	L'écoulement d'air à travers la surface du rotor de la turbine éolienne . . . . .	81
A.2	Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique . . . . .	84

A.1	Diagramme de la chaîne éolienne . . . . .	85
A.2	Diagramme de la turbine avec asservissement de vitesse . . . . .	86
A.3	le diagramme de la génératrice à double alimentation . . . . .	86
A.4	Diagramme de la commande de l'onduleur . . . . .	87
A.5	Diagramme de la commande direct des puissances . . . . .	87
A.6	Diagramme de la chaîne photovoltaïque . . . . .	88
A.7	Diagramme du hacheur survolteur . . . . .	88
A.8	Diagramme de la commande MPPT <i>P&amp;O</i> . . . . .	89



---

# Nomenclature

AC Alternating Current (courant alternatif)

DC Direct Current (courant continu)

FEM Force Electro-Motrice

GADA Générateur asynchrone a double alimentation

GPV Générateur photovoltaïque

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

MADA Machine asynchrone a double alimentation

MAS Machine asynchrone

MLI Modulation de Largeur d'Impulsion

MPPT Maximum Point Power Tracker

PI Régulateur Proportionnel Intégral



---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie électrique est devenue un élément essentiel au quotidien depuis le XVI<sup>ème</sup> siècle. Dans ces dernières décennies, elle est devenue plus importante et peut être considérée comme une nécessité d'ordre naturel au même titre que l'eau, à cause de l'ampleur de l'industrialisation et de la multiplication des appareils domestiques. Cette forte croissance de la demande de l'énergie électrique a mis les pays devant plusieurs problèmes, à savoir les problèmes d'épuisement des réserves des énergies fossiles dans le futur et du taux de pollution élevé de la planète par les gaz à effet de serre.

D'autre part, le monde a connu une augmentation du coût de l'énergie électrique au début des années soixante-dix avec un taux annuel moyen de 11% à 12% à cause de la hausse des prix de pétrole au cours de cette période alors qu'il y était presque constant au cours des années 1960 jusqu'au début des années 1970.

Face à ce dilemme, les états ont encouragé la recherche d'autres alternatives qui pourraient remplacer les sources habituelles. Les chercheurs proposent d'abord l'alternative de l'utilisation de l'énergie nucléaire qui en dépit de son efficacité a de nombreuses conséquences négatives telles que : les déchets atomiques, le réchauffement des écosystèmes avoisinants les installations établies et le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl le 26 avril 1986). Pour cela, les chercheurs voient que l'énergie renouvelable, comme la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'éolien, le solaire, etc, présentent la solution adéquate qui couvre le besoin énergétique en diminuant les gaz émis par l'énergie fossile. Cette énergie renouvelable est caractérisée par sa souplesse, sa simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activité. Cependant, l'utilisation de ces énergies est limitée par la variabilité des ressources qui risque de diminuer leur fiabilité.

En plus, les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources énergétiques disponibles. Pour surmonter cette limite, la solution à retenir, en particulier pour les sites isolés, est certainement le recours et la combinaison de plusieurs sources, telles que les systèmes hybrides éolien-photovoltaïques.

Dans ce contexte, nous nous intéressons à l'étude d'un système hybride éolien-photovoltaïque. Ce dernier est le plus adapté à remédier à la problématique de l'intermittence des sources photovoltaïque et éolienne, puisque, le vent est généralement plus fort la nuit quand l'énergie solaire est absente et vice versa. À cet effet, notre travail consiste, dans un premier temps, à une modélisation mathématique et simulation des deux systèmes énergétiques, séparément. Les résultats de la simulation pour chaque système sont alors présentés et discutés. Ensuite, une combinaison entre les deux systèmes est établie à travers une simulation. Ce travail nous a permis d'assimiler le fonctionnement des composants du système hybride à travers des modèles mathématiques plus ou moins simples, mais aussi de les simuler sur MATLAB/SIMULINK avec des résultats fiables.

Le présent document est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous passons en revue les différentes caractéristiques des composants du système hybride.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation des deux systèmes énergétiques.

Enfin, le chapitre trois traite de la combinaison des deux systèmes à travers une simulation suivie d'une discussion des résultats obtenus.

---

# Généralité sur les systèmes éolien-photovoltaïque

## 1.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à un passage en revue des différents composants du système hybride (éolien + photovoltaïque) en citant leurs types, leurs principes de fonctionnement et les technologies utilisées.

## 1.2 Généralités sur les systèmes éoliens

### 1.2.1 Histoire de l'énergie éolienne

La première utilisation de l'énergie du vent remonte à 5000 ans avant Jésus-Christ. Les occupants de la Chine actuelle sont les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune équipés de voiles pendant plusieurs milliers d'années. Le vent ne sera utilisé que pour se déplacer.

Au 7<sup>e</sup> siècle après Jésus-Christ, les Perses furent les premiers à ériger des tours munies de pales en roseau servant à écraser le grain et irriguer les cultures. Il faudra attendre le 11<sup>e</sup> siècle pour voir apparaître les premiers moulins à vent en Europe servant à moudre le blé et pomper l'eau. Ils sont constitués de quatre pales tournant autour d'un axe horizontal.[Che-15]

Jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle, des améliorations sont apportées progressivement au moulin à vent. Il se développe dans toute l'Europe, et en particulier aux Pays-Bas, et est implanté sur le nouveau continent par les colons. Les moulins à vent ont alors de plus en plus d'applications et sont utilisés notamment pour scier le bois, pour traiter les épices et le tabac. En 1887, l'Américain

Charles Bosch construit la première éolienne entièrement automatisée composée de 144 balancelles, mesurant 18 m de haut et pèse 3,6 tonnes. Elle alimente une génératrice de 12 KW .

En 1890, le Danois Poul La Cour construit la première éolienne industrielle permettant de générer de l'électricité. Les années suivantes, il mit au point plusieurs prototypes et découvre qu'en réduisant le nombre de pales, la vitesse de rotation du rotor augmente. Une de ces éoliennes expérimentales existe toujours à Skof, au Danemark.

En 1920, le français Georges Darius développa un prototype d'éolienne avec un rotor à axe vertical et l'allemand Albert de Betz démontra scientifiquement que la totalité de l'énergie cinétique du vent n'est pas utilisable. ce qui est aujourd'hui la base de la conception d'éoliennes.

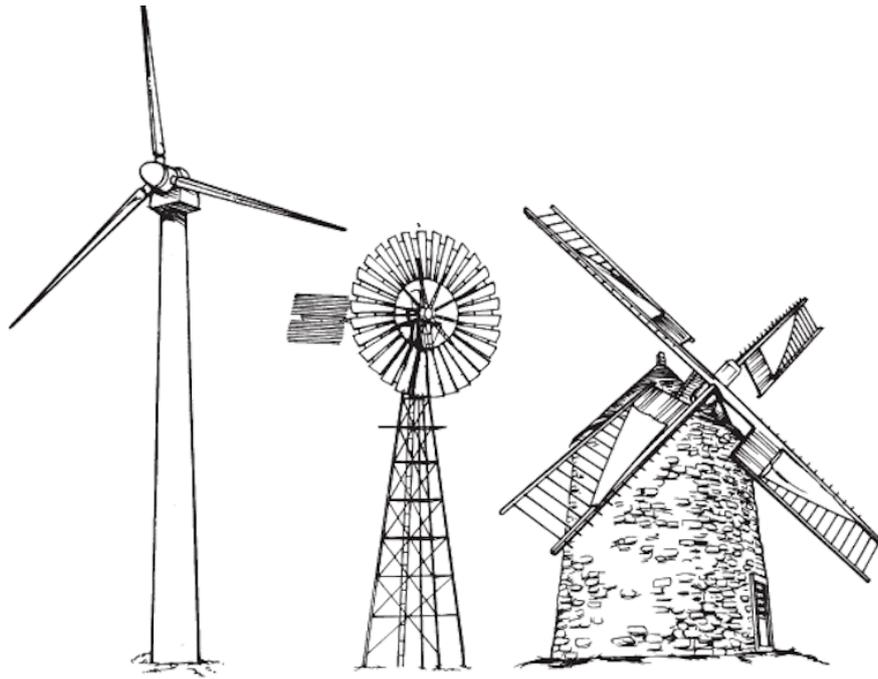
En 1957, la turbine Gantzer fut créée par le danois Johannès Yoles. Cette éolienne tripale à pivot générait une puissance de 200 kW et est toujours une référence en matière de conception. En 2002, le Danemark a mis en service le plus grand parc d'éoliennes offshore.

En effet, l'énergie éolienne est la source d'énergie qui croit le plus vite dans le monde. On estime une croissance moyenne annuelle de 40% ces dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe. [Che-15] Cette progression est en rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1%. Par contre, le charbon n'a pas du tout augmenté dans les années 90. Les perspectives sont tout aussi spectaculaires. L'EWEA (European Wind Energy Association) estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040.

En 2006, l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf avec une puissance de 50 MW et une autre à Adrar avec une puissance de 10 MW. [Che-15]

### **1.2.2 Origine du vent**

En fonction de la géométrie de la planète terrestre, le rayonnement solaire est reparti d'une façon différente sur l'atmosphère. Cette variation cause une différence de température qui induit à son tour une différence de densité de masse d'air, provoquant des circulations particulières d'une altitude à une autre. [Dje,Mel-20]



**FIGURE 1.1 – Histoire de l'énergie éolienne**

#### **1.2.2.1 Force de pression :**

L'air a tendance à s'écouler naturellement de la zone de haute pression vers la zone de basse pression. Cette force est le gradient de pression causé par le chauffage inégal de l'air en raison des différentes latitudes et propriétés du sol et la répartition des océans et des continents. [Dje,Mel-20]

#### **1.2.2.2 Force gravitationnelle :**

Elle résulte de l'attraction mutuelle des corps, et intervient à cause de la grande masse de la terre et est dirigée vers le centre de la terre. [Dje,Mel-20]

#### **1.2.2.3 Force de Coriolis :**

C'est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent. Cette force dévie tout objet en mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. [Dje,Mel-20]

#### 1.2.2.4 Direction et la vitesse du vent

Le vent est dirigé en principe des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents [Dje,Mel-20].

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents, en fonction de leurs vitesses, en 17 catégories dont nous citons quelques-unes dans le tableau (??) :

Degrés Beaufort	$V_{vents}(m/s)$	$V_{vents}(km/h)$	description générale	pression sur surface plane ( $daN/m^2$ )
0	0 à 0.4	< 1	calme	-
3	3.5 à 5.5	12 à 19	petite brise	3.2
4	5.5 à 8	20 à 28	jolie brise	6.4
6	11.4 à 13.9	39 à 49	vent frais	22
8	17.4 à 20.4	62 à 74	coup de vent	52
11	28.4 à 32.5	103 à 117	violante tempete	117
17	54.1 à 60	202 220	cyclone	470

TABLE 1.1 – l'échelle de Beaufort

#### 1.2.3 Présentation du système éolien

Une éolienne ou un aérogénérateur est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique via une génératrice. Ceux-ci peuvent être regroupés sur un même site pour former un parc éolien. [Dje,Mel-20]

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

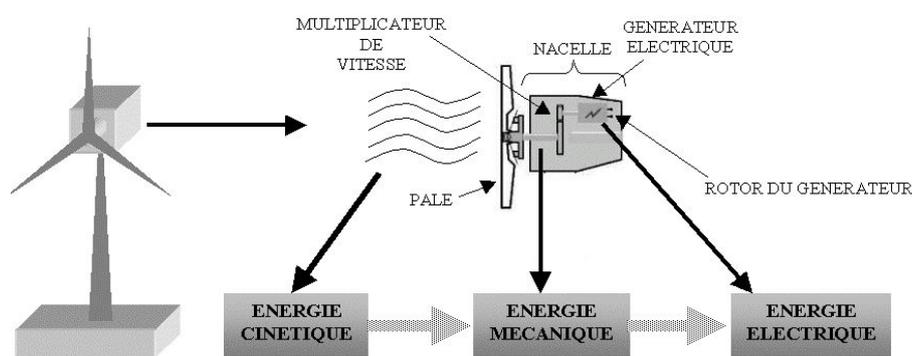
- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW .
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

Le tableau (1.2) classe les turbines selon la puissance et le diamètre de leur hélice

Éolienne	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	Moins de 12 m	moins de 40 kW
Moyenne	de 12m à 45m	de 40 à 1 MW
Grande	46m et plus	1 MW et plus

**TABLE 1.2 – Classement des éoliennes**

la figure (1.2) illustre la conversion de l'énergie cinétique du vent à l'aide d'une turbine pour obtenir une énergie mécanique qui va être convertie en énergie électrique en utilisant une génératrice.



**FIGURE 1.2 – La chaîne de conversion d'une éolienne**

### 1.2.3.1 Types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

- Éolienne à axe vertical VAWT.
- Éolienne à axe horizontal HAWT.

#### Éoliennes à axe horizontal :

L'appellation est relative à l'axe de rotation du rotor, qui est parallèle à la direction de vent. Elles se composent généralement d'hélices à deux ou trois pales, ou encore des multiples hélices pour l'utilité de pompage de l'eau. Ce sont les plus répandues actuellement du fait que :

- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

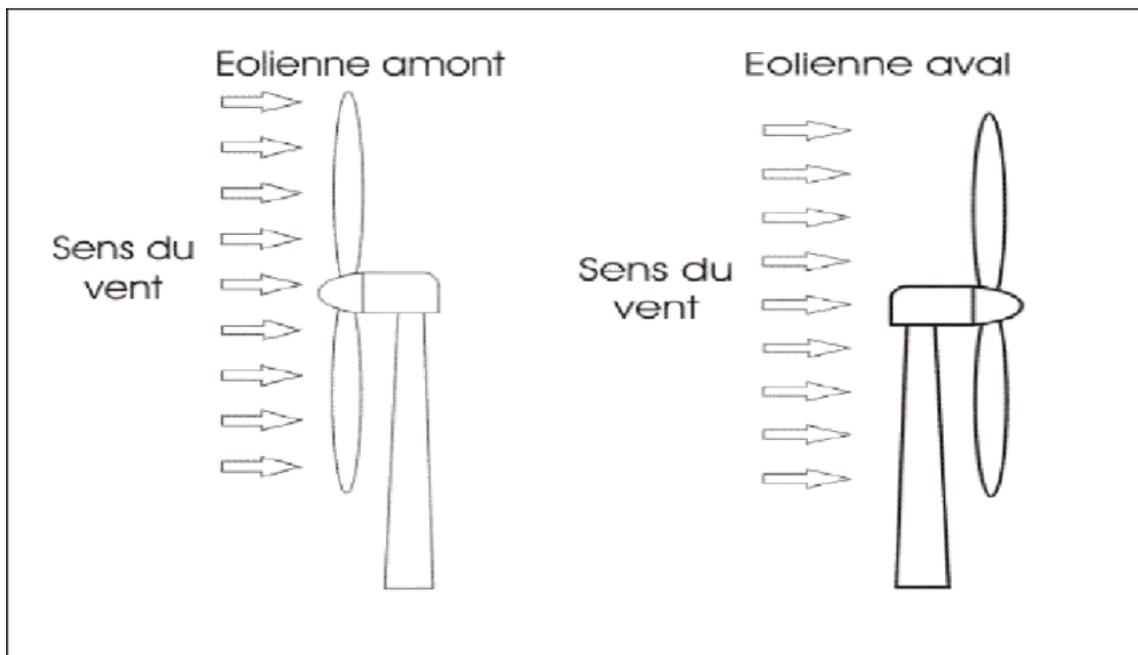
Sur la base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes :

**-Éoliennes à rotation lente “multipales” :**

Elles sont relativement répandues dans les campagnes, et servent au pompage de l’eau.

**-Éoliennes à rotation rapide :**

Ce sont les éoliennes bi ou tripales à rotation rapide, et sont essentiellement affectées à la production d’électricité. Il faut encore différencier ces dernières en aérogénérateur dont l’hélice est en amont de la machine par rapport au vent, *hélice au vent* et celle dont l’hélice est en aval de la machine par rapport au vent. *hélice sous le vent*. [HASS-10]



**FIGURE 1.3 – Les éoliennes à axe horizontal**

**Éoliennes à axe vertical :**

Pour ce type d’éoliennes, l’axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent. Ces éoliennes étaient les premières structures développées pour produire de l’électricité.

Elles possèdent l’avantage d’avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol; donc elles sont facilement accessibles, plus adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d’orientation.[HASS-10]

Deux d’entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

- L’éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l’un par rapport à l’autre. Elle est simple à fabriquer et elle démarre avec des vitesses de vent de l’ordre de  $2\text{ m/s}$ , ce que présente un avantage.

• L'éolienne inventée par le français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.[HASS-10]

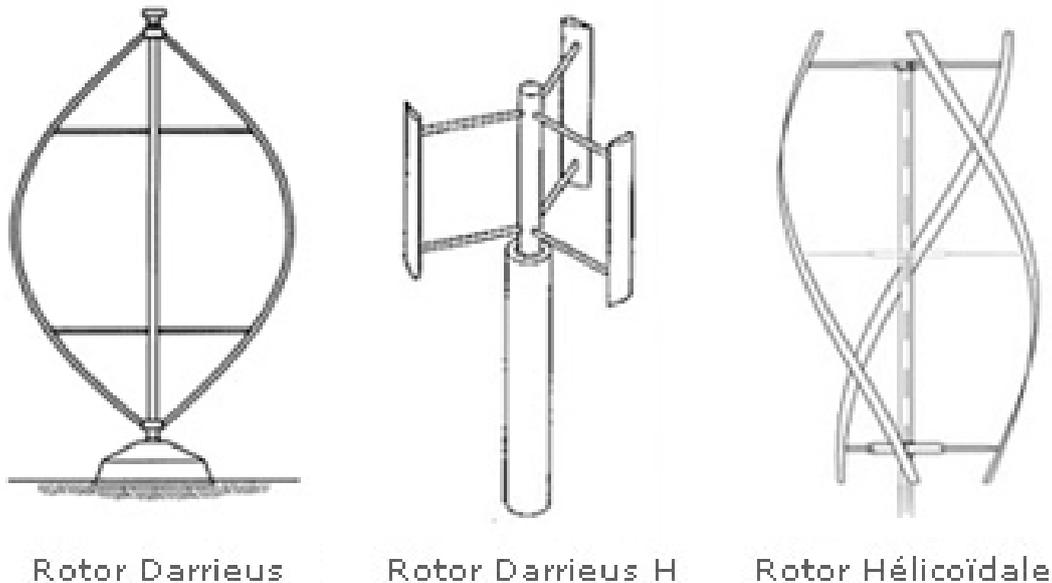


FIGURE 1.4 – Les éoliennes a axe verticale

### 1.2.4 Principe de fonctionnement

Les éoliennes ont pour but de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- **Au niveau de la turbine (rotor)**, responsable de la conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent disponible en énergie mécanique. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- **Au niveau de la génératrice**, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.

## 1.2.5 Structure d'une éolienne

La majorité des éoliennes installées dans le monde étant à axe horizontal, nous traiterons alors les éléments clés constituant ces dernières.

### 1.2.5.1 Mât

C'est un support, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et pour améliorer le captage de l'énergie. [Ham-08]

### 1.2.5.2 Nacelle

C'est le cœur de l'éolienne. Elle contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [HAM-08]

### 1.2.5.3 Rotor

le rotor formé par les pales assemblées dans leur moyeu.

- Les pales, qui permettent de capter la puissance du vent et la transformer au rotor.
- Le moyeu, c'est le support des pales. Le moyeu doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne ou lors des changements brusques de la vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé, et non réalisé par soudure, bien que sa forme soit ainsi plus difficile à réaliser [Che-15]

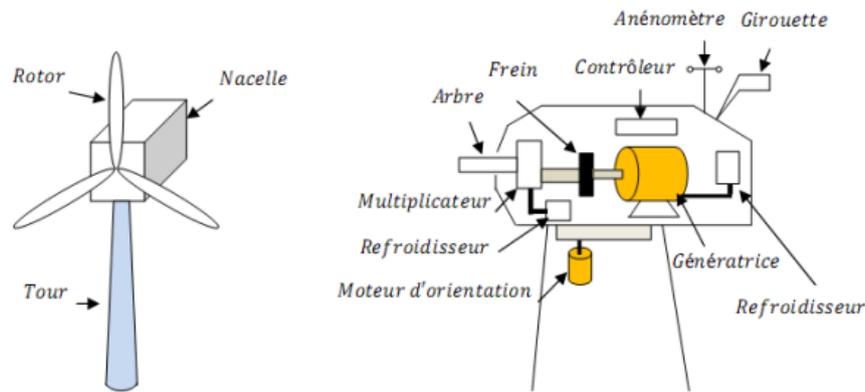


FIGURE 1.5 – Structure d'une éolienne

## 1.2.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement. [Lou-16]

### 1.2.6.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et inépuisable contrairement aux énergies fossiles .
- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement et elle ne cause aucune émission des gaz à effet de serre .
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, la saison où la demande d'électricité est la plus forte.
- Seulement 2% du sol des terres agricoles est requis pour l'installation des éoliennes.
- L'énergie éolienne est une énergie qui répond aux besoins locaux (la diminution des pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie).
- Moins chère à produire.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- Excellent taux de retour énergétique .

### 1.2.6.2 Inconvénients

- L'impact sur le paysage (esthétique).
- Limite de Betz seulement 16/27 de la puissance du vent peut être récupéré .
- Le problème de bruit (basse fréquence infrason ).
- Utilisation des terres rares pour la fabrication des génératrices (pollution à l'extraction ex :néodyme et dysprosium ).
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant intermittente, ce qui provoque l'instabilité de la production.
- Le cout de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques surtout pour les sites moins ventés.

### 1.2.7 Générateur électrique

La génératrice est un dispositif permettant de produire à partir de l'énergie mécanique une énergie électrique. De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe ou variable. Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans l'industrie éolienne :

- Générateur asynchrone à cage d'écureuil.
- Générateur asynchrone à double alimentation.
- Générateur synchrone.

#### 1.2.7.1 Générateur asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone MAS est le premier type de génératrice qui a été utilisée pour les éoliennes de grande puissance. Elle présente des avantages certains liés à sa conception simple, sa fabrication peu coûteuse, sa robustesse, son poids et son inertie faibles et le peu d'entretien qu'elle requiert. [Lou-16]

Le générateur à cage d'écureuil peut être connecté directement au réseau, un multiplicateur est relié à la machine de plus d'un banc de condensateur pour compenser l'énergie réactive

demandée par cette génératrice qui fonctionne en mode hyper-synchrone où le glissement  
 $g < 0$  . [Dje,Mel-20]

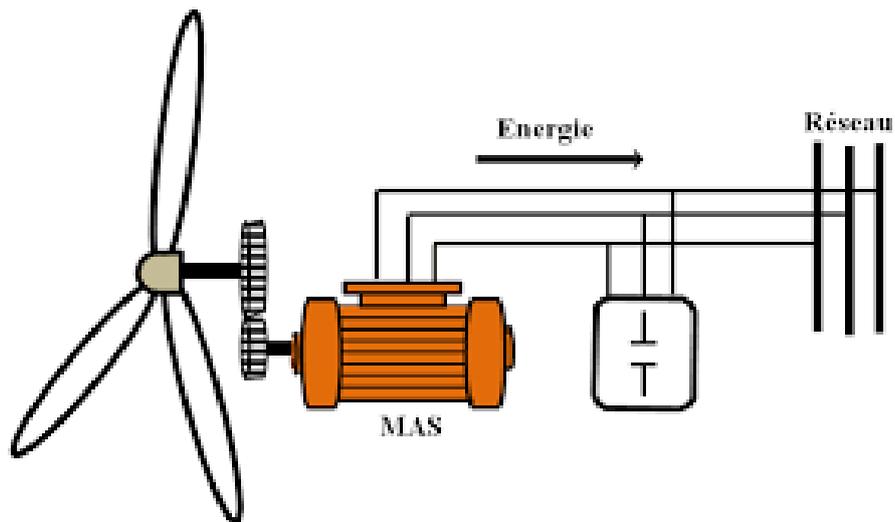


FIGURE 1.6 – Éolienne à base d'une machine asynchrone a cage d'écureuil

### 1.2.7.2 Générateur asynchrone à double alimentation (GADA)

La constitution du stator de la GADA est la même pour la machine synchrone ou asynchrone à cage d'écureuil. L'originalité de la GADA provient du fait que le rotor n'est plus à cage, ce dernier est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités reliées à des bagues conductrices. Cette machine nous offre l'avantage de passer d'un fonctionnement à un autre tout à fait acceptable. Effectivement la GADA est une machine généralisée (peut fonctionner en mode asynchrone ou synchrone). [Sai, Yah -14]

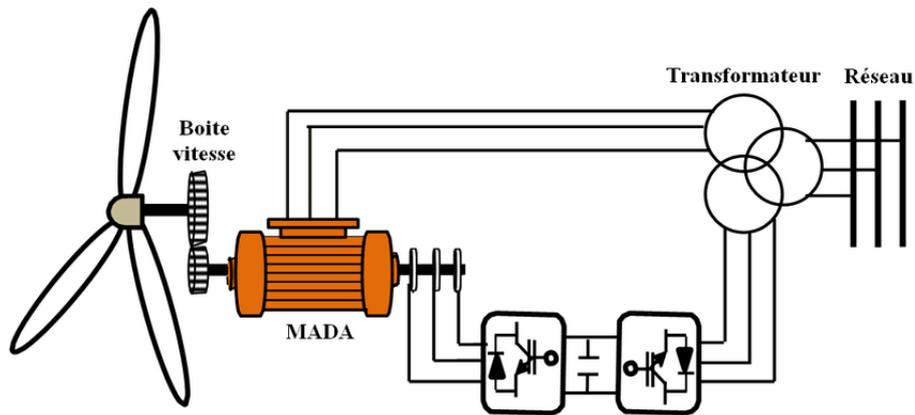


FIGURE 1.7 – Éolienne à base d'une machine asynchrone a double alimentation

### 1.2.7.3 Générateurs synchrones ( GS)

Ils sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. Il est construit avec un grand nombre de pôles afin de développer des couples mécaniques importants. Ce type de générateur est généralement couplé avec un convertisseur de puissance pour la connexion au réseau. Le générateur synchrone est avantageux en taux de défaillance réduits à cause de l'élimination du multiplicateur de vitesse et du système bagues et balais. [Kel-11],[Dje,Mel-20]

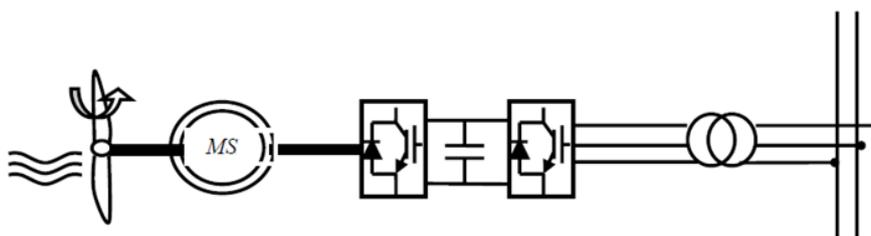


FIGURE 1.8 – Éolienne à base d'une machine synchrone

### 1.2.7.4 Comparaison entre les trois générateurs

La simplicité de fabrication du générateur asynchrone à cage d'écureuil et le fait d'être moins cher lui donne un avantage par rapport aux deux autres types de générateurs. Par contre

le courant de démarrage élevé de la machine et le problème d'accrochage et décrochage au réseau représentent des inconvénients de ce type de générateurs. Par ailleurs, la machine asynchrone à double alimentation a l'avantage d'accessibilité au rotor et au stator ce qui rend facile la mesure du courant et partant le contrôle du flux électromagnétique. Mais l'inconvénient majeur de cette machine est l'existence des balais et des bagues ce qui rend le nombre de défaillances important et des coûts de maintenance élevés. D'autre part, la machine synchrone est avantageuse du fait qu'elle peut se passer d'un multiplicateur de vitesse, mais c'est une machine à fort couple d'encombrement important et des convertisseurs statiques dimensionnés pour permettre le transit de la puissance nominale de l'aérogénérateur. [Dje,Mel-20],[Lou-16]

## 1.3 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### 1.3.1 Survol historique

- En 1839, Alexandre Edmond Becquerel a fait des expériences sur une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydée, cette pile fournit un courant dès lors qu'elle est éclairée, c'est l'effet photovoltaïque.

ol-19!

- En 1872, Willoughby Smith, un ingénieur anglais, met tout d'abord en évidence la photoconductivité du sélénium et quatre ans plus tard William Grylles et Richard Evans montrent que le courant traversant un barreau de sélénium raccordé à une batterie peut changer de sens lorsque le semi-conducteur est exposé à la lumière .

ol-19!

- En 1883, l'inventeur américain Charles Fritts recouvre un substrat métallique d'une fine couche de sélénium, puis d'une couche d'or très fine, pour fabriquer une cellule photovoltaïque qu'il installe au sommet d'un toit à New York.

ol-19!

- Un procédé de tirage de lingots de silicium monocristallin est mis au point en 1918 par Jon Czochochralski, un scientifique polonais. l'intérêt du dopage du silicium est mis en évidence en 1939 par Russel Ohl qui décrit, deux ans plus tard, le principe d'une jonction pn à effet photovoltaïque.

ol-19!

- En 1954 des chercheurs américains des laboratoires Bell présentent , lors d'une conférence de presse, la première cellule photovoltaïque.

- La première application des cellules photovoltaïques dans un satellite de l'armée américaine en 1960.

ol-19!

- Le début des années 1970 voit l'émergence de nouvelles applications telles que l'électrification des sites isolés non raccordée au réseau électrique, dans lesquels les modules photovoltaïques sont associés à un système de stockage.

ol-19!

### 1.3.2 Généralités sur le soleil et le rayonnement solaire

Le soleil est une sphère de constitution plasmatique (70.5% hydrogène, 27.2% hélium, 2% un mélange de plus de 100 éléments ) de 1393000 km et une distance de 149598106 km de la terre. Il émet une puissance sous forme d'ondes électromagnétiques (30% de cette puissance est réfléchié vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisé comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère et la source de vents ).[Dje,Mel-20][Hal-17]

Le rayonnement solaire est émis de manière isotrope et s'étend dans tous les domaines du spectre électromagnétique. La partie la plus énergétique qui va du proche ultraviolet à l'infrarouge, provient essentiellement de la photosphère. Mis à part l'ultraviolet extrême, ce rayonnement peut être globalement représenté par celui d'un corps noir porté à 5780 K, température caractéristique de la photosphère.[Sol-19]

Le spectre solaire a une longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu m$  et se décompose sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0,4\mu m$ )
- 38% dans la bande visible ( $0,4\mu m, 0,7\mu m$ )
- 53% dans la bande des infrarouges ( $> 0,7\mu m$ )

L'énergie solaire reçue en dehors de l'atmosphère est estimée à  $1350 W/m^2$ , et en traversant l'atmosphère celle-ci s'atténue et perd de son intensité à cause de la réflexion et la diffusion de la lumière, pour ne pas dépasser les  $1000 W/m^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption. L'intensité de la lumière variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site. [Dje-20][Hal-17][Sol-19]

Étant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère, seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre sous trois différentes formes de rayonnement :

- **Le rayonnement direct** est la fraction du rayonnement en provenance de la direction du soleil. Il s'agit de l'éclairement énergétique solaire provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages. [Dje,Mel-20][Sol-19]
- **Le rayonnement diffus** est une radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les diverses molécules de l'atmosphère. Elle représente 25 à 50 % du rayonnement annuel disponible. [Dje,Mel-20][Sol-19]
- **Le rayonnement réfléchi (albédo)** est la faible fraction du rayonnement reçu qui provient de la réflexion du rayonnement incident par le sol ou tout objet se trouvant au niveau du sol (la mer et les bâtiments en verre, la neige et le Sahara) . [Dje,Mel-20][Sol-19]

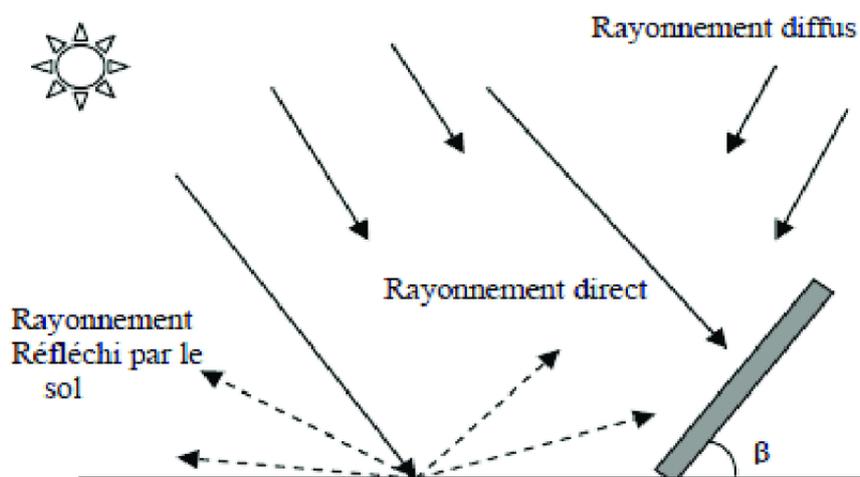


FIGURE 1.9 – les différents types du rayonnement solaire

### 1.3.3 Coordonnées géographiques terrestres

#### 1.3.3.1 Latitude

Est définie par la distance angulaire d'un site par rapport au plan de l'équateur, mesurée en degrés, comprise entre  $-90$  à  $+90$ , positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud. [Dje,Mel-20]

#### 1.3.3.2 Longitude

Est une coordonnée terrestre qui permet de localiser un point à l'est ou à l'ouest de Greenwich, elle est définie par la distance angulaire de ce point au méridien d'origine mesurée en degrés. [Dje,Mel-20]

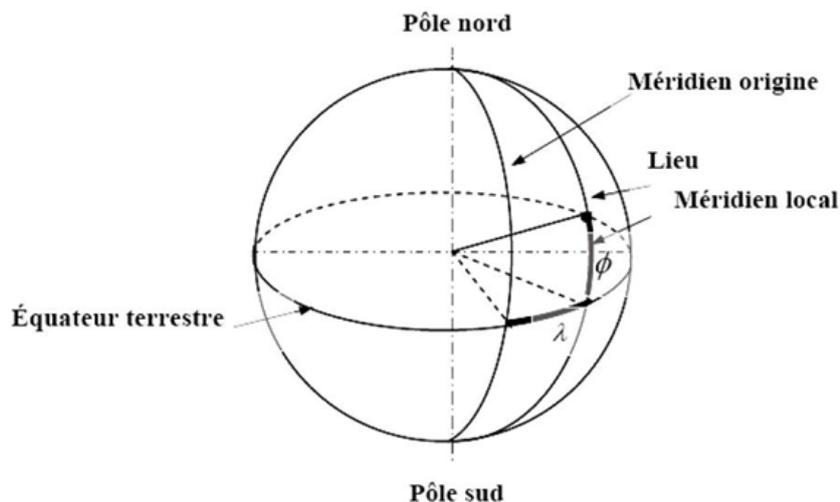
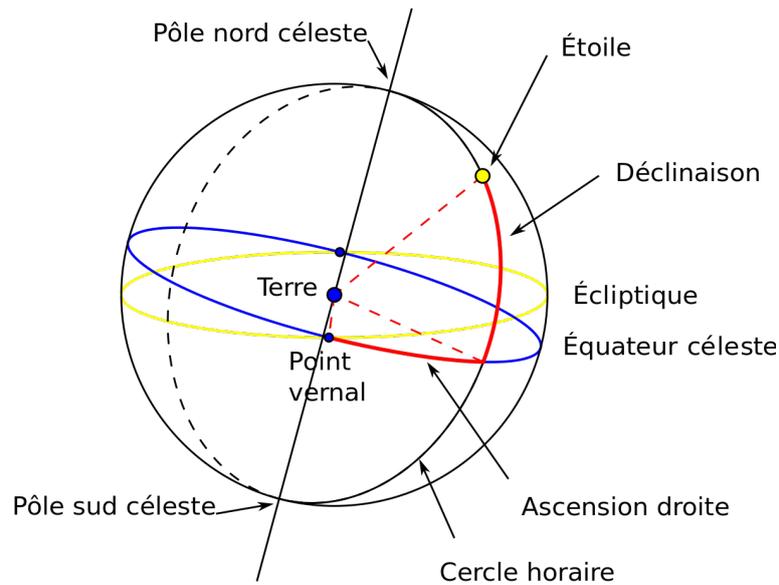


FIGURE 1.10 – La latitude et la longitude

#### 1.3.3.3 Déclinaison

La déclinaison d'un astre est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan équatorial céleste (parallèle au plan équatorial terrestre) elle varie entre  $-23,45$  et  $+23,45$ . Elle devient nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre) et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre) .[Dje,Mel-20]



**FIGURE 1.11 – La déclinaison**

#### **1.3.3.4 Azimut $a$**

l'azimut est l'angle entre la projection de la direction du soleil dans le plan horizontal et le méridien nord pris comme direction de référence. L'azimut est compté positivement dans le sens rétrograde (vers l'est). Il vaut 180 lorsque le soleil passe au méridien local. L'azimut du point cardinal vaut +90, celui du point cardinal ouest vaut 270 .[Sol-19]

#### **1.3.3.5 Hauteur $h$**

Hauteur du soleil également appelée élévation angulaire au-dessus de l'horizon, est sa distance angulaire à l'horizon. Elle prend des valeurs comprises entre 0 et 90° pendant le jour, et négative à la nuit .[Sol-19]

### **1.3.4 Énergie photovoltaïque**

#### **1.3.4.1 Effet photovoltaïque**

C'est la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la

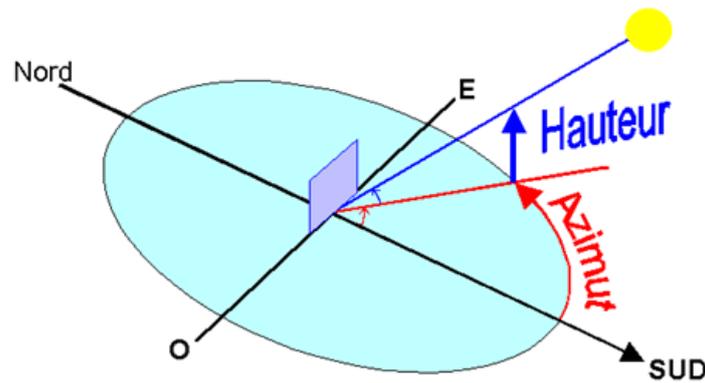


FIGURE 1.12 – Hauteur et azimut

bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant dans le matériau lorsque celui-ci est polarisé. [Tat,Ben-18]

#### 1.3.4.2 Dopage du silicium

Le silicium intrinsèque a une faible conductivité et ne peut donc pas être utilisé tel quel pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Cependant, il est possible, en introduisant certaines impuretés en quantité contrôlée, par technique du dopage, de privilégier un type de conduction : par électrons libres ou trous libres .[Sol-19]

##### Dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à incorporer un atome ayant cinq électrons dans la couche de valence dans le réseau cristallin du silicium. Le phosphore est généralement utilisé. Quatre des cinq électrons de valence du phosphore vont former des liaisons covalentes avec quatre atomes de silicium voisins, chaque liaison étant due à deux électrons dans le même état orbital, mais de spin opposé. [Dje,Mel-20][Sol-19]

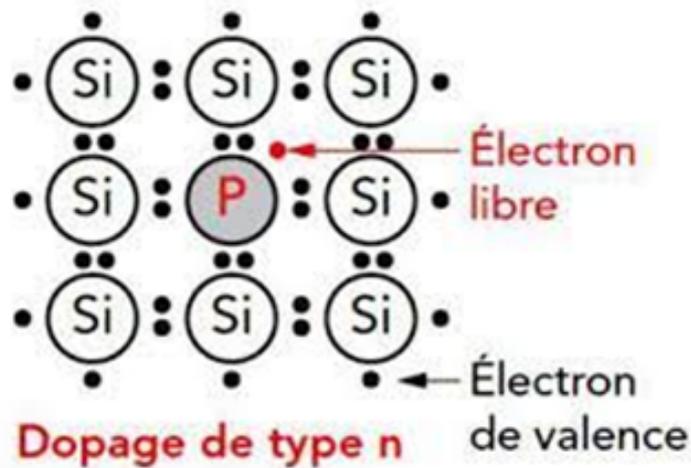


FIGURE 1.13 – Dopage de type N

### Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à incorporer un atome trivalent dans le réseau cristallin du silicium. Dans le cas du silicium, l'atome de bore est fréquemment utilisé. Il s'associe avec les quatre atomes de silicium voisins en associant ses trois électrons de valence avec trois atomes de silicium pour réaliser des liaisons covalentes et en libérant une place vacante dans la quatrième liaison.[Sol-19]

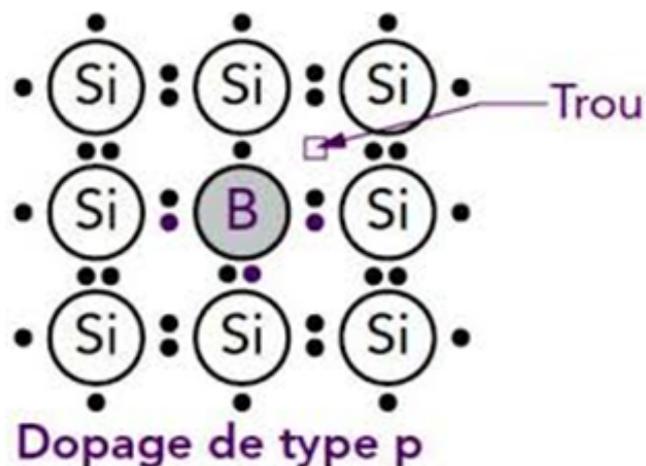


FIGURE 1.14 – Dopage de type P

### 1.3.4.3 Jonction PN

La notion " jonction PN" indique une zone dont le dopage varie d'une manière brusque entre deux régions semi-conductrices respectivement dopée  $n$  et  $p$ , telle que ces jonctions sont divisées en deux catégories : homojonctions ( ou les régions  $n$  et  $p$  sont du même matériau) et hétérojonctions ( les régions  $n$  et  $p$  sont de deux matériaux différents) [Dje,Mel-20][Sol-19]

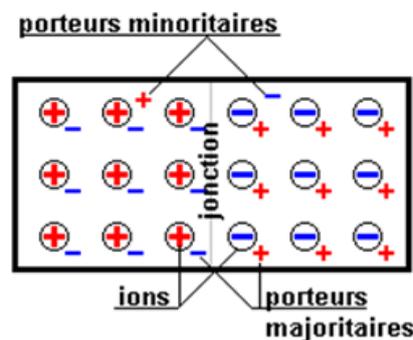


FIGURE 1.15 – Jonction PN

### 1.3.5 Cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement

Une cellule solaire est un capteur constitué d'un matériau absorbant dans la bande optique du spectre solaire. Ce matériau doit posséder une transition possible entre deux niveaux d'énergie (d'une énergie lumineuse à une énergie électrique) et être suffisamment conducteur pour permettre le passage du courant électrique. Les semi-conducteurs dopés répondent parfaitement à ces critères.[Sol-19]

Lorsque les rayonnements solaires frappent la cellule, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN permettant la libération des électrons et des trous en créant ainsi des paires « électron-trou ». Le champ électrique qui constitue une barrière de potentiel va séparer cette paire. Afin que les électrons et les trous se recombinent, les électrons sont obligés de passer par un circuit extérieur en créant un courant électrique continu appelé photo courant et

une tension appelée photo tension. Le produit des deux engendre une puissance électrique.[Dje,Mel-20][Tat-1

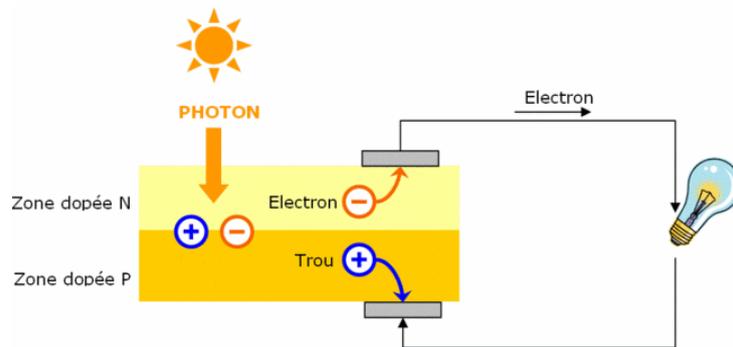


FIGURE 1.16 – Principe de fonctionnement d'une cellule PV

### 1.3.6 Types de cellules photovoltaïques

Les types des cellules photovoltaïques diffèrent par leurs rendements et leurs coûts. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement est compris entre 8 et 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle : [Sla-11]

#### 1.3.6.1 Cellules mono-cristallines :

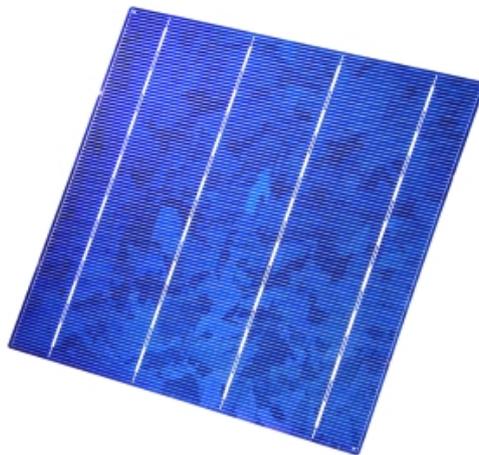
Ce sont celles qui s'approchent le plus des modèles théoriques, et ont le meilleur rendement (de 12% à 18% voire jusqu'à 24,7% au laboratoire) ce qui explique leur coût élevé, du fait que le silicium pur coûte cher .[Sla-11]



**FIGURE 1.17 – Cellule monocristalline**

### **1.3.6.2 Cellules poly-cristallines :**

Ce sont les plus disponibles dans le marché du fait que leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant, leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voire jusqu'à 19,8% au laboratoire) .[Sla-11]



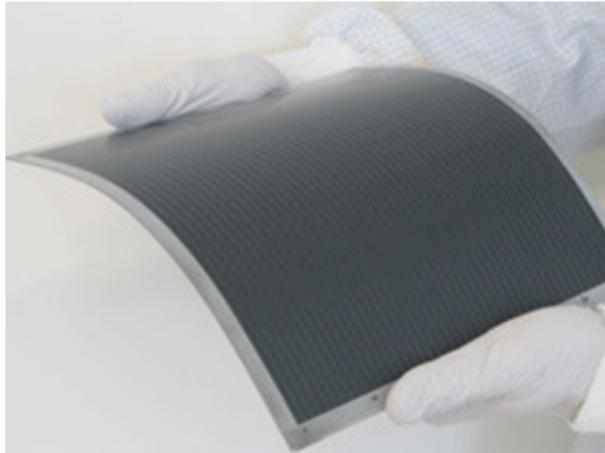
**FIGURE 1.18 – Cellule polycristalline**

### **1.3.6.3 Cellules amorphes :**

Ce type de cellule est fabriqué à base de silicium hydrogéné (l'état non cristallin). Il se caractérise par son coût le plus bas et sa fabrication nécessite moins de matières premières. Cette technologie s'agit d'un procédé utilisé pour déposer des matériaux en couche mince sur

un substrat à partir d'un état gazeux (vapeur) dans un réacteur préalablement mis sous vide secondaire.

La cellule amorphe permet au panneau de fonctionner avec éclairage faible (même en temps couvert ou à l'intérieur du bâtiment). Cependant, elle représente le rendement le plus faible (5% à 8% voire jusqu'à 13%). Elle est utilisée dans des petits produits comme les calculatrices et les montres. [Dje,Mel-20]



**FIGURE 1.19 – Cellule amorphe**

### **1.3.7 Module photovoltaïque :**

Pour obtenir des tensions et des courants supérieures à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires, il faut constituer des interconnexions de ces derniers en série ou en parallèle pour former des modules photovoltaïques. [Sol-19]

Le panneau photovoltaïque est l'association des modules photovoltaïques en série et en parallèle en ajoutant deux diodes de protection, une connectée en série qui sert à éviter les courants inverses et l'autre en parallèle nommé diode by-pass qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules et sert à limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production. [Dje,Mel-20]

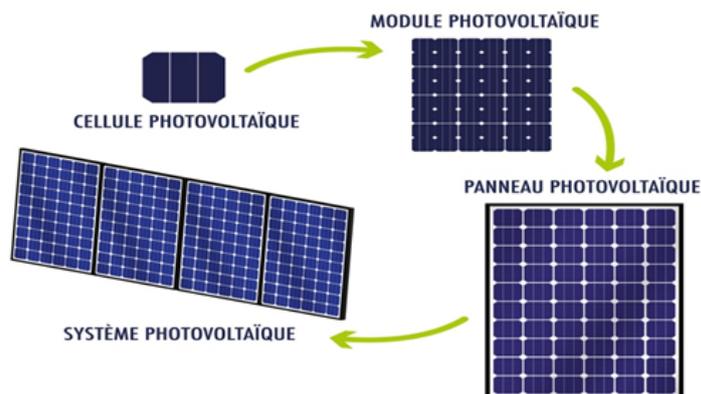


FIGURE 1.20 – La formation d’un système photovoltaïque a partir d’une cellule

## 1.3.8 Avantages et inconvénients de l’énergie photovoltaïque

### 1.3.8.1 Avantages

- Énergie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L’énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Elle réduit la vulnérabilité aux pannes d’électricité.
- L’extension des systèmes est facile, la taille d’une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d’amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

### 1.3.8.2 Inconvénients

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

- Elle nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher

## **1.4 Problématique et objectif**

### **1.4.1 Problématique**

Pour l'alimentation des sites isolés, il est possible de compter sur la production décentralisée de l'énergie électrique. Cette production peut être effectuée à base des énergies propres et renouvelables telles que le vent (énergie éolienne) et le soleil (énergie thermique et photovoltaïque). À cause de l'inconstance des conditions climatiques comme l'éclairement et le vent, le contrôle de tels systèmes (éolien et photovoltaïque) pose un défi important, ce qui fait le sujet de notre problématique.

### **1.4.2 Objectif**

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude et le contrôle des systèmes photovoltaïque et éolien afin d'extraire le maximum de puissance de ces deux sources et les combiner pour avoir un système hybride éolien-photovoltaïque.

## **1.5 Conclusion**

Ce chapitre a été divisé en deux parties principales : Dans la première partie, nous avons donné un aperçu général sur l'énergie renouvelable éolienne. Nous avons aussi cité les types et les composants d'un aérogénérateur ainsi que les avantages et les inconvénients de cette énergie. Ensuite, nous avons débattu les différents types des générateurs utilisés dans ce domaine de production de l'énergie électrique.

Une autre partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation de l'énergie photovoltaïque : Type de cellules, type de technologies et association des cellules pour former des panneaux

photovoltaïques. Aussi, nous avons discuté le principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que les avantages et les inconvénients de cette dernière.

Dans le prochain chapitre, nous donnerons la modélisation des deux systèmes d'énergie pour les simuler dans l'environnement Matlab/Simulink.

---

# **Modélisation des systèmes photovoltaïque et éolien**

## **2.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une revue globale sur les systèmes photovoltaïque ainsi que les systèmes éoliens et leurs différents types. Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la simulation des deux systèmes, séparément.

Dans la première partie, nous aborderons les notions de base des systèmes photovoltaïques, puis nous présenterons le modèle mathématique d'un générateur PV. Ensuite, nous utiliserons une technique de commande MPPT en choisissant la méthode de "perturbation et observation" et nous présentons les résultats de la simulation.

Dans la deuxième partie, nous allons d'abord modéliser les différents composants de la turbine éolienne en utilisant la commande de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique. Nous nous intéresserons par la suite à la modélisation mathématique de la machine asynchrone à double alimentation dans le référentiel de Park et au développement d'une commande vectorielle directe en utilisant le régulateur type Proportionnel-Intégral pour commander indépendamment les puissances active et réactive issues du système aérogénérateur.

## **2.2 Partie photovoltaïque**

### **2.2.1 Modèle électrique et mathématique de la cellule PV :**

Le circuit équivalent de la cellule photovoltaïque à une diode sous éclairage est un circuit qui comporte un générateur de courant afin de simuler le flux lumineux incident, une

diode pour modéliser le phénomène de la polarisation de la cellule. Le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance shunt.

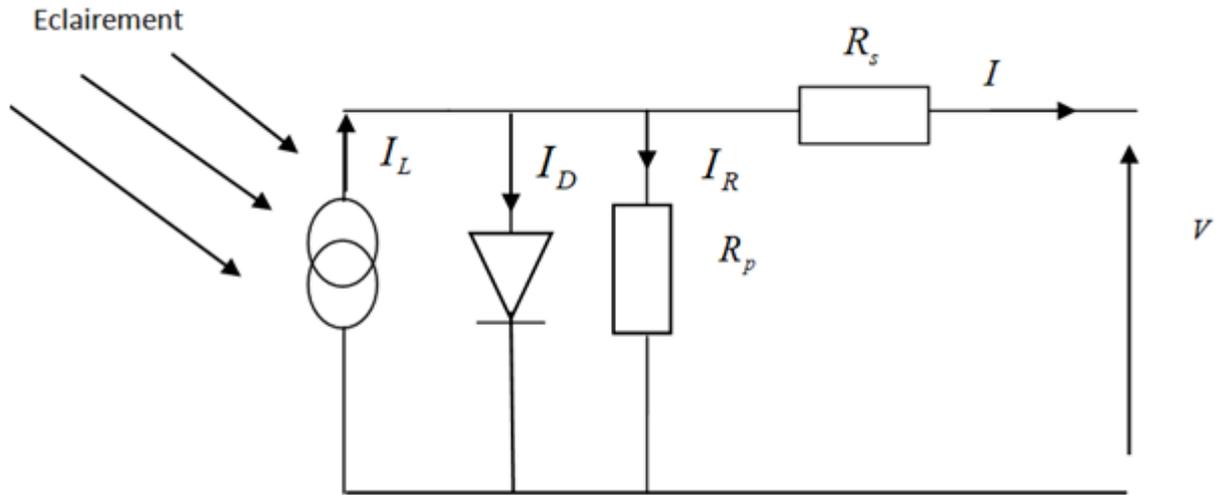


FIGURE 2.1 – Modèle électrique de la cellule PV

La loi des nœuds permet d'écrire :

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (2.1)$$

Le courant de jonction  $I_D$  est donné par :

$$I_D = I_0 \left[ e^{q \left( \frac{V + IR_S}{nkt} \right)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Le courant dans la résistance  $R_p$  est donné par :

$$I_R = \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (2.3)$$

À partir de l'équation (2.1) et en remplaçant les équations (2.2) et (2.3) nous obtenons l'équation caractéristique suivante :

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{q \left( \frac{V + IR_S}{nkt} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (2.4)$$

où  $I$  est Le courant de cellule,  $V$  La tension de cellule,  $R_s$  La résistance série de la cellule  $[\Omega]$ ,  $T$  La température de la cellule  $[^{\circ}K]$ ,  $q$  La charge d'électron  $e = 1.6 \times 10^{-19} C$ ,  $I_0$  Le courant de saturation  $[A]$ ,  $K$  La constante de Boltzmann  $K = 1.3854 \times 10^{-2} J K^{-1}$  et  $n$  Le facteur de qualité de diode.

On pose que  $R_p = \infty$ , d'où l'équation (2.4) devient :

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{q \left( \frac{V + IR_s}{nkt} \right)} - 1 \right] \quad (2.5)$$

## 2.2.2 Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

### 2.2.2.1 Puissance crête

C'est la puissance électrique maximale que peut produire un module pour un éclairement de  $1000 W/m^2$  et sous une température de  $25^{\circ}C$ .

### 2.2.2.2 Caractéristique courant-tension :

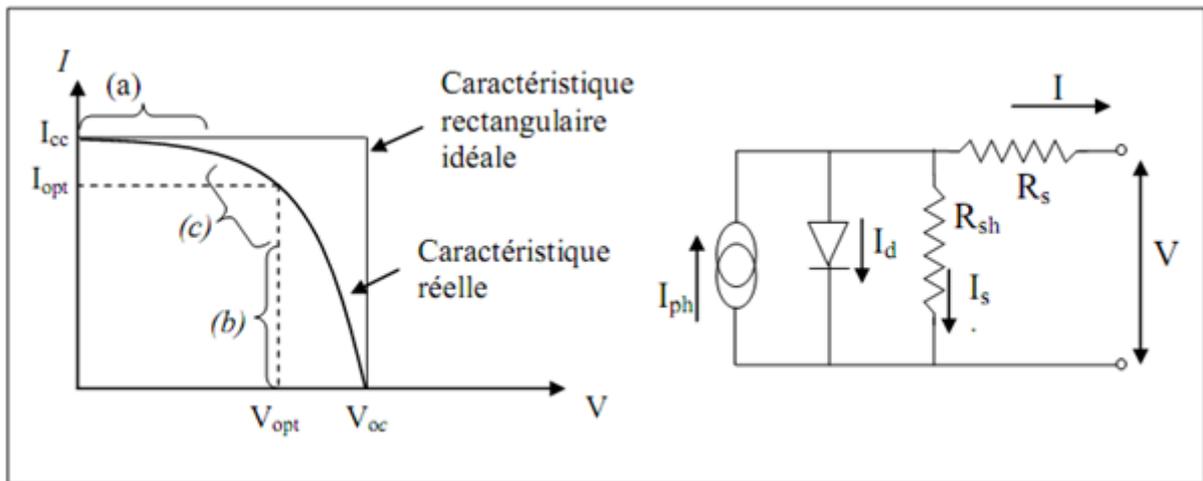


FIGURE 2.2 – Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension se divise en trois parties [Fel-12] :

- La zone (a) à laquelle la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement.
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$ .

— La zone ( $c$ ) dans laquelle l'impédance interne du générateur varie rapidement.

### 2.2.2.3 Tension à circuit ouvert $V_{co}$ :

En circuit ouvert,  $I = 0$ . La jonction se polarise à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , qui peut être déterminé graphiquement ou en résolvant l'équation  $I(v) = 0$

$$0 = I_L - I_0 \left[ e^{q \cdot \left( \frac{V_{co}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (2.6)$$

Tension à circuit ouvert dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

### 2.2.2.4 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V = 0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [Sol-19]

### 2.2.2.5 Point de fonctionnement optimum $s(V_m, I_m)$ :

Le point de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est déterminé par l'intersection de sa caractéristique courant-tension et de celle de la charge qui lui est raccordée. Dans des conditions de flux lumineux et de température constants, la cellule n'impose ni une tension de fonctionnement ni un courant. C'est le circuit extérieur qui va déterminer le point de fonctionnement caractérisé alors par un couple de valeurs  $(I, V)$ . Lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil »  $P_m = V_m I_m$  [Sol-19].

### 2.2.2.6 Facteur de forme $ff$ : ([Sol-19])

Le facteur de forme ( $FF$ ) est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale extraite de la cellule et la puissance théorique qui serait obtenue avec un point de fonctionnement

défini par un courant de court-circuit et une tension de circuit ouvert ( $I_{cc}, V_{co}$ ) :

$$FF = \frac{I_{pm}V_{pm}}{I_{CC}V_{CO}} \quad (2.7)$$

### 2.2.2.7 Rendement de conversion $\eta$ [Sol-19]

Le rendement de conversion en puissance est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{p_m}{p_{in}} \quad (2.8)$$

La relation liant le rendement avec le facteur de forme est donnée comme suit :

$$\eta = \frac{FFI_{cc}V_{co}}{P_{in}} \quad (2.9)$$

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

### 2.2.3 Hacheur parallèle ( Boost) :

Un convertisseur Boost ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur est utilisé comme adaptateur source-charge, pour extraire le maximum de puissance de GPV.[Tat,Ben-18]

Il est constitué d'éléments réactifs qui ne consomment aucune énergie dans le cas idéal, ce qui justifie son rendement élevé. [Fel-19]

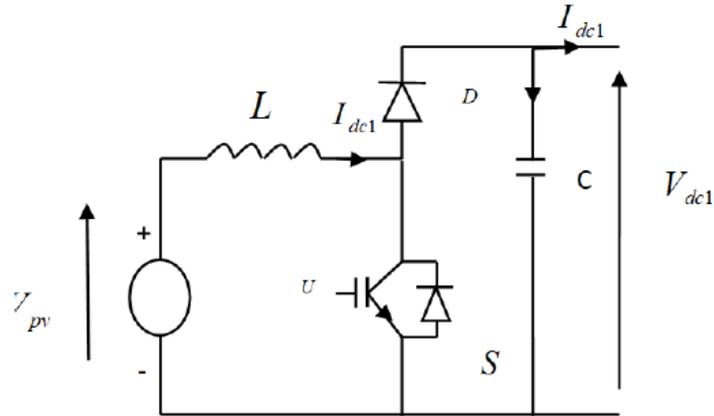


FIGURE 2.3 – Schéma électrique du hacheur Boost

### 2.2.3.1 Principe du fonctionnement [Sol-19]

Une période de fonctionnement  $T$  du convertisseur Boost peut se décomposer en deux phases, suivant l'état de l'interrupteur  $K$  :

1- Pendant le temps  $\alpha T$ , l'interrupteur  $K$  est fermé et l'énergie est stockée dans l'inductance  $L$ . La diode  $D$  est bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation. La tension  $V_L$  aux bornes de l'inductance devient égale à  $V_e$ . Le courant qui traverse l'inductance augmente.

2- L'interrupteur  $K$  est ensuite ouvert. L'inductance se trouve alors en série avec le générateur. La tension  $V_s$  aux bornes de la charge devient égale à  $V_e - V_L$  (avec  $V_L < 0$ ). Le courant traversant l'inductance traverse la diode  $D$ , le condensateur  $C$  et la charge  $R$ . L'énergie accumulée dans l'inductance est ainsi transmise vers la capacité.

En conduction continue, les formes d'onde, de courant et de tension de ce convertisseur sont représentées sur la figure (2.4).

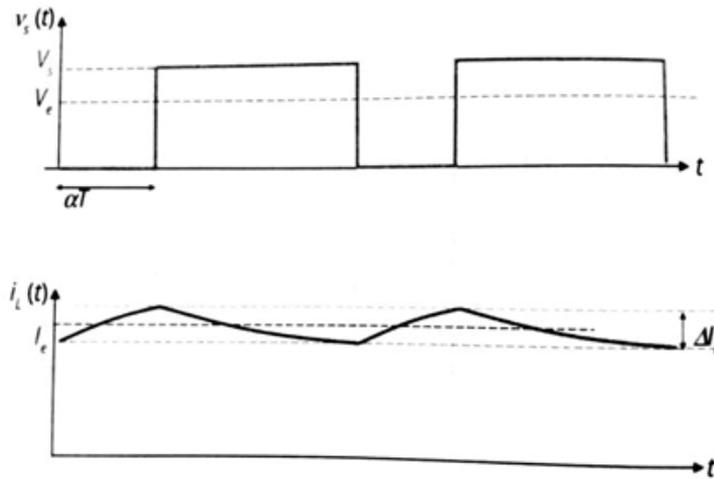


FIGURE 2.4 – Signal de commande des interrupteurs

### 2.2.3.2 Détermination des paramètres du hacheur Boost

a) Rapport cyclique  $\alpha$  :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{out}} \cdot \mu \quad (2.10)$$

b) Inductance  $L$  :

$$L \geq \frac{V_{pv} \cdot \alpha}{f_s \Delta i_L} \quad (2.11)$$

tel que :

$$\Delta i_L = 30\% i_L = 0.3 \frac{P}{V_{pv}} \quad (2.12)$$

c) Capacité d'entrée  $C_{in}$

$$C_{in} = \frac{\Delta i_L}{8 f_s \Delta V_{pv}} \quad (2.13)$$

Avec :

$$\Delta V = 1\%V_{pv} \tag{2.14}$$

d) Capacité de sortie  $C_{out}$

$$C_{out} \geq \frac{i_0(max)}{f_s \Delta V_{out}} \tag{2.15}$$

Avec :

$$\begin{cases} \Delta V_{out} = 1\%V_{out} \\ I_0(max) = \frac{P_{pv}}{V_{out}} \end{cases} \tag{2.16}$$

### 2.2.4 Principe de la commande MPPT avec un régulateur itératif (P&O) :

Le MPPT ( maximum power point tracker) est défini en étant un étage intermédiaire d'adaptation. C'est une stratégie de commande qui consiste à déterminer la puissance à chaque instant en mesurant le courant et la tension en entrée ou en sortie du convertisseur statique et à ajuster en conséquence la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque en faisant varier le rapport cyclique  $\alpha$ . La tension de sortie peut également être réglée en faisant varier la fréquence de hachage  $f$ . [Tat,Ben-18]

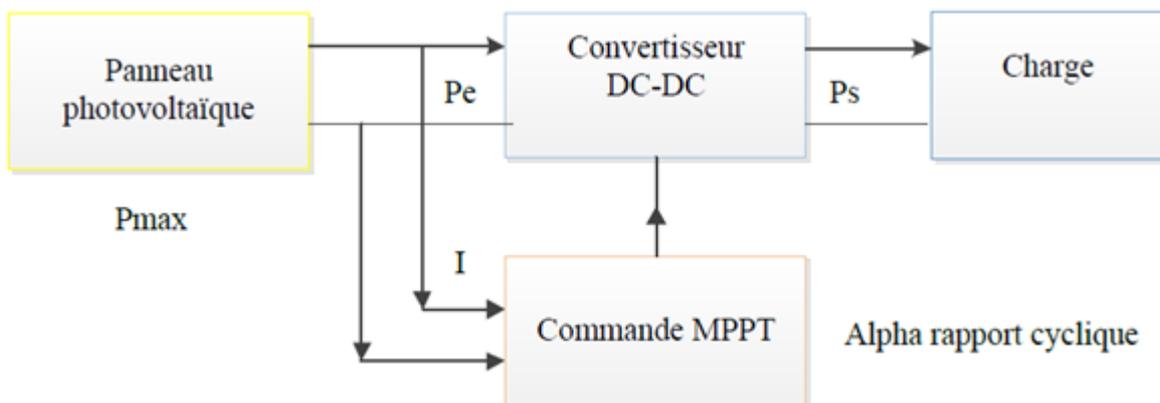


FIGURE 2.5 – Principe du MPPT pour le système solaire photovoltaïque

Il existe plusieurs algorithmes de commande MPPT. Nous choisissons pour notre étude la méthode de perturbation et observation (Perturb and Observe *P&O*). Cette méthode repose sur le fait d'observer la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque après la perturbation de sa tension.

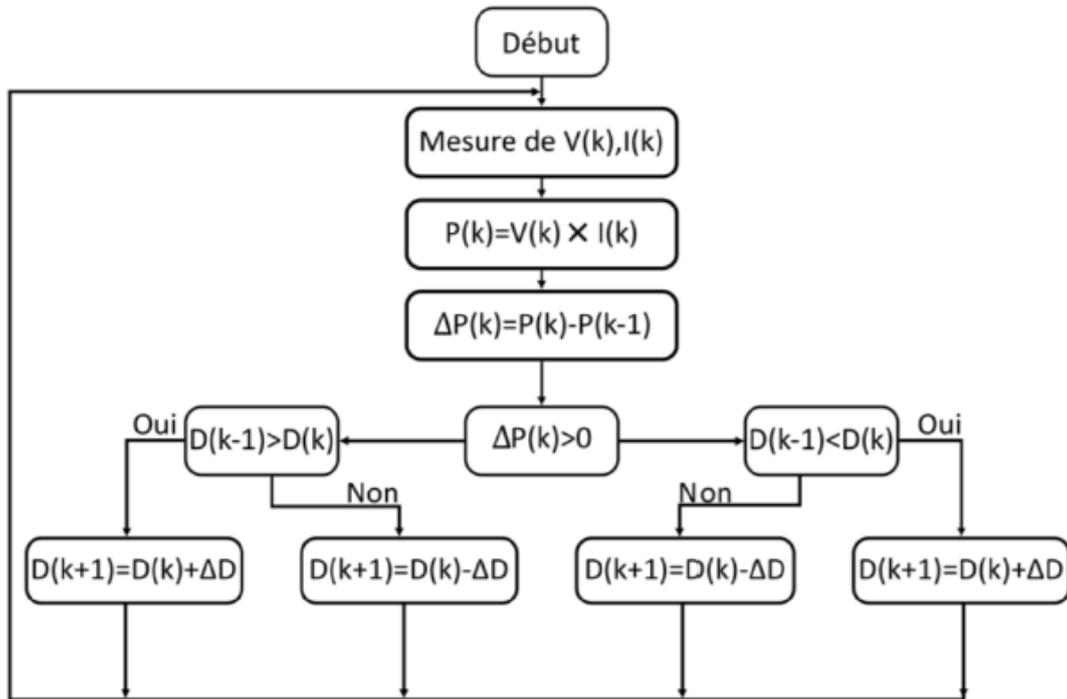


FIGURE 2.6 – Organigramme de l’algorithme perturbation et observation

### 2.2.5 Caractéristique du GPV

La figure (2.7) représente les courbes des caractéristiques courant-tension  $I=f(V)$  et puissance-tension  $P=f(V)$  dans les conditions standards ( $E = 1000W/m^2$ ,  $T = 25c$ ) d’un panneau photovoltaïque type Yingli Energy (China) YL245P-29b : Ces courbes sont obtenues par l’utilisation de l’environnement MATLAB/ Simulink/Simpower System.

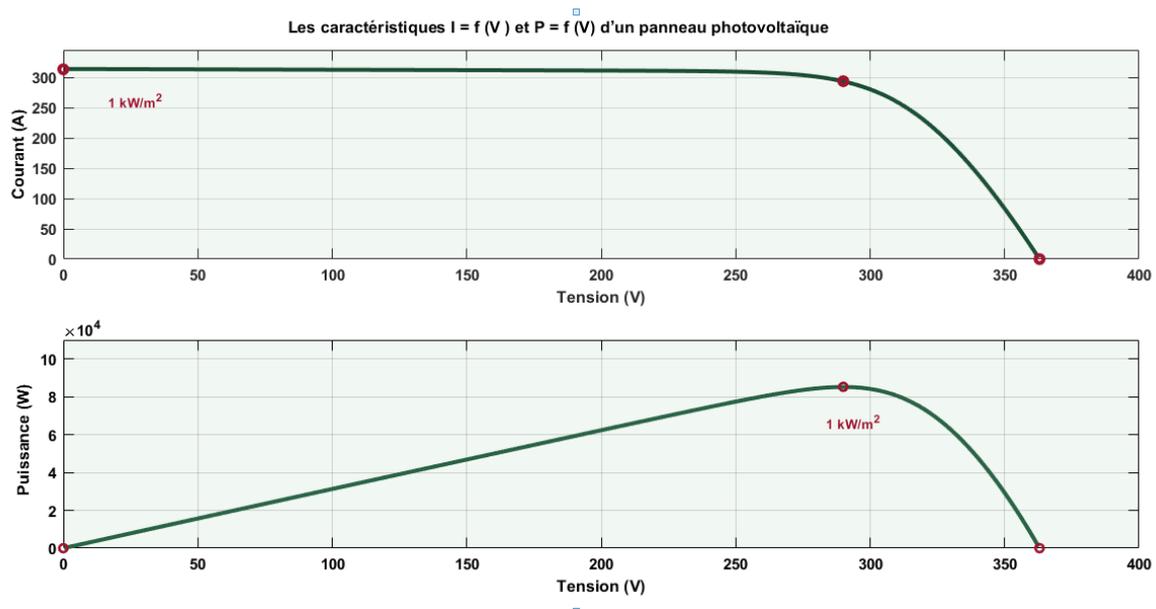


FIGURE 2.7 – Caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'un panneau photovoltaïque

### 2.2.5.1 Influence de l'éclairement

La figure (2.8) représente l'évolution du courant et de la puissance générée par le module photovoltaïque composé de 2 panneaux en fonction de la tension à température fixe et éclairement variable :

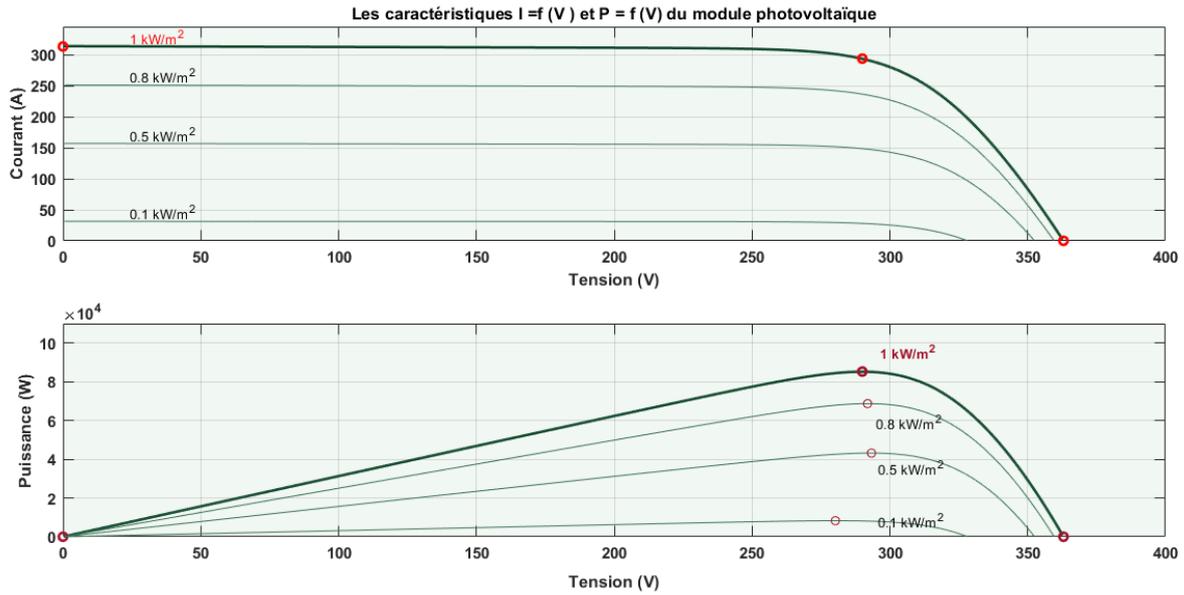
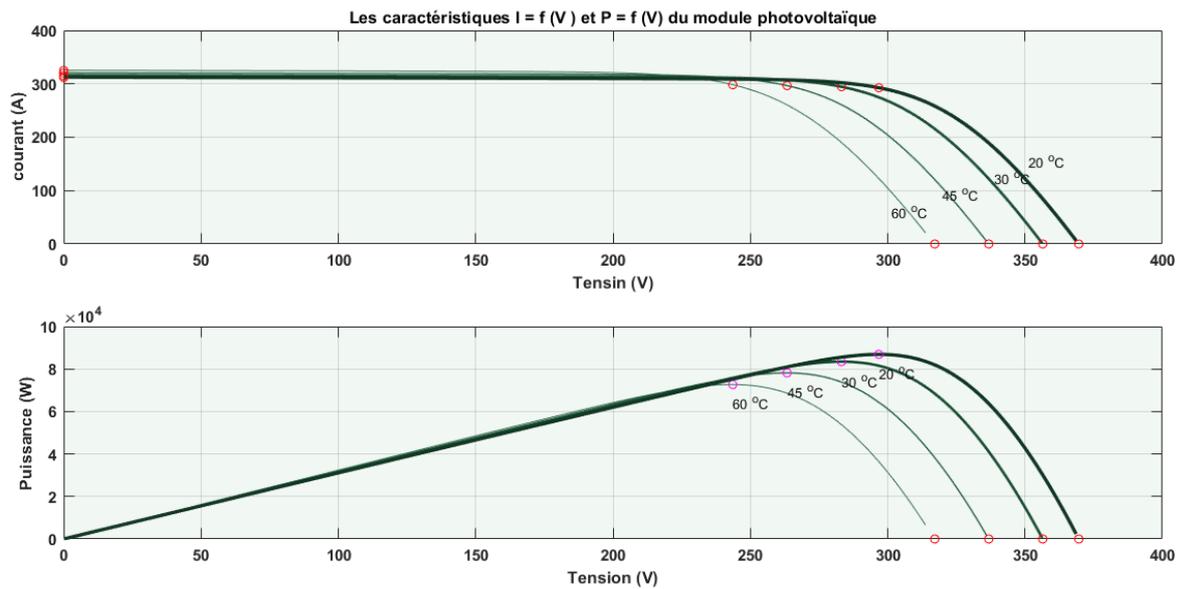


FIGURE 2.8 – Caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  du module photovoltaïque

On remarque que le courant a une variation importante proportionnelle à celle de l'éclairement, autrement dit le courant du court-circuit augmente lorsque l'éclairement augmente tandis que la tension varie légèrement. De même, l'augmentation de la puissance est due à l'augmentation de l'éclairement.

### 2.2.5.2 Influence de la température

La figure (2.9) représente les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  à éclairement fixe et une température variable :



**FIGURE 2.9 – Les caractéristiques  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  du module photovoltaïque**

## 2.2.6 Résultats de simulation

La simulation est effectuée dans l'environnement MATLAB/Simulink/ Simpower System, afin d'évaluer les performances du système photovoltaïque composé de 2 panneaux photovoltaïques type Yingli Energy (China) YL245P-29b en appliquant la commande MPPT avec la technique perturbation et observation. Les conditions prise en compte lors de la simulation sont :

- Température ambiante à  $T = 25C$  .
- Le rayonnement solaire est homogène sur toute la surface du panneau.

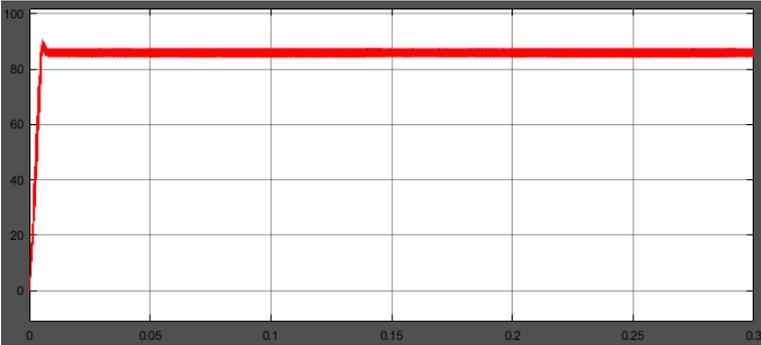


FIGURE 2.10 – Allure de tension du système PV en fonction du temps

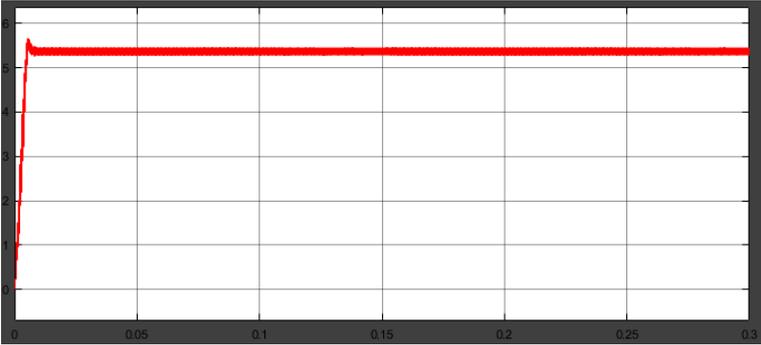


FIGURE 2.11 – Allure du courant du système PV en fonction du temps

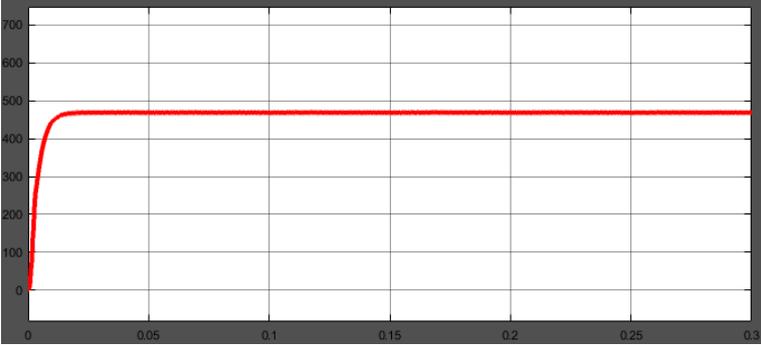


FIGURE 2.12 – Allure des puissances en fonction du temps

a) À éclairement variable

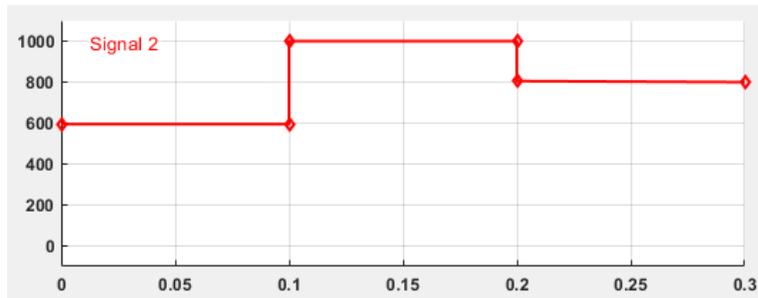


FIGURE 2.13 – Allure de variation de l'éclairement

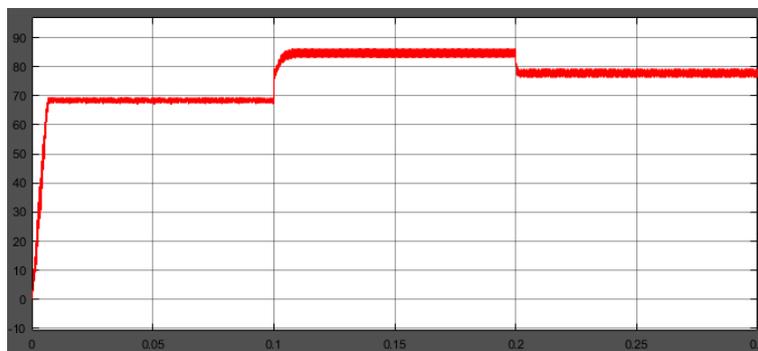


FIGURE 2.14 – Allure de la tension du système PV à éclairement variable

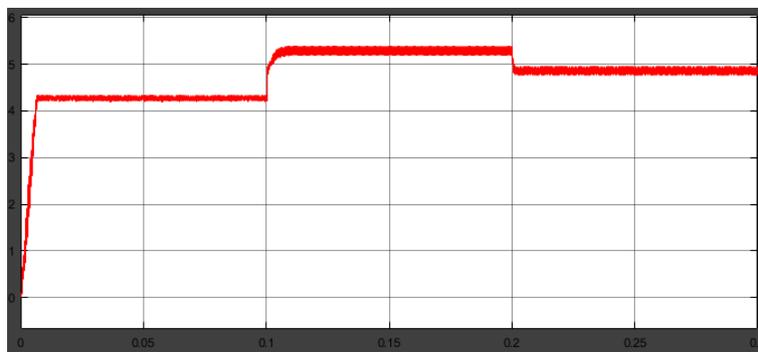
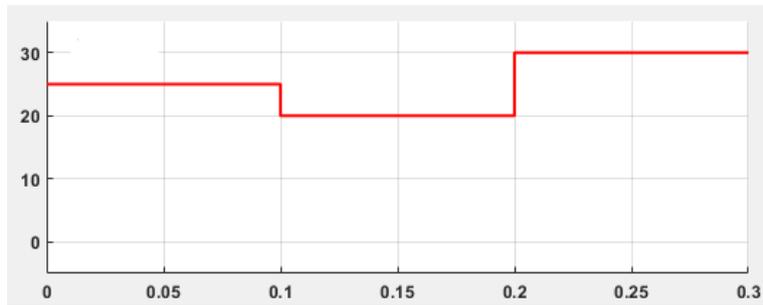
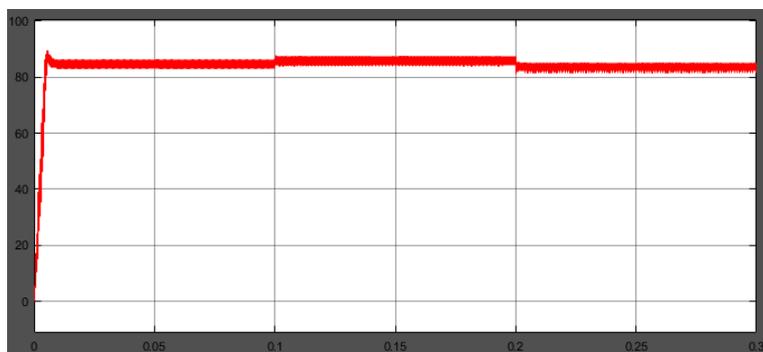


FIGURE 2.15 – Allure du courant à éclairement variable

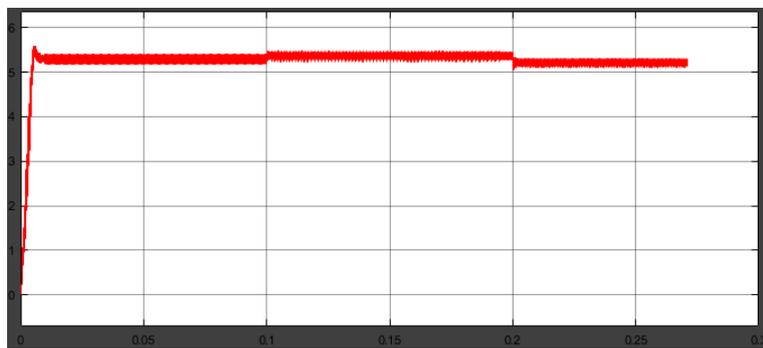
**b) À température variable**



**FIGURE 2.16 – Allure de variation de température**



**FIGURE 2.17 – Allure de tension à température variable**



**FIGURE 2.18 – Allure du courant à température variable**

## 2.2.7 Interprétation des résultats

Les figures (2.11)(2.10) (2.12), représentent la tension, le courant et la puissance à éclaircissement et température constante.

On remarque des faibles oscillations autour du point maximal qui deviennent constantes au régime permanent, On remarque aussi que la puissance de sortie du système est quasiment la même que la puissance générée par le champ photovoltaïque, ce qui nous garantie le bon fonctionnement de commande MPPT.

Les figures (2.14) (2.15), représentent la tension et le courant de sortie à éclaircissement variable [800 600 1000] W/m<sup>2</sup>. On remarque qu'ils réagissent correctement à la variation de l'éclaircissement pour se stabiliser au point maximal.

La figure (2.17) (2.18) droite représente respectivement la tension et le courant à température variable [25 30 20] °C. On remarque que la tension augmente à chaque fois que la température diminue.

D'après les résultats présentés, on constate que le hacheur et la MPPT accomplissent correctement leur rôle qui est d'atteindre le point de puissance maximale.

## 2.3 Partie éolienne

### 2.3.1 Modélisation de la turbine

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente l'efficacité aérodynamique de la turbine éolienne, et dépend de ses caractéristiques aérodynamiques et ses conditions de fonctionnement.

$$C_p = c_1 - c_2(\beta - c_3) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)}\right) - c_4(\lambda - c_5)(\beta - c_3) \quad (2.17)$$

où  $\beta$  est l'angle de calage et  $\lambda$  le rapport de vitesse, telle que[Lou-16][Kel-11] :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb}R}{v_{vent}} \quad (2.18)$$

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
0.35	0.00167	2	0.00184	3

**TABLE 2.1 – Valeurs des coefficients**

Où  $\Omega_{turb}$  est la Vitesse angulaire mécanique de la turbine (mesurée en  $rad/s$ ),  $V$  la vitesse du vent (mesurée en  $m/s$ ) et  $R$  le Rayon de la turbine ou longueur de pale (mesurée en  $m$ ).

L'aérogénérateur ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance. C'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission calculée selon la relation

$$P_m = \frac{1}{2} c_p(\lambda) \rho s v_1^3 \quad (2.19)$$

où  $\rho$  est la densité d'air égale à  $1.225 kg/m^3$  à la pression atmosphérique à  $15C$ .

Le couple  $C_{aer}$  produit par cette éolienne est alors déduit :

$$C_{aer} = \frac{P_m}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2\Omega_{turb}} \frac{1}{2} c_p(\lambda) \rho s v_1^3 \quad (2.20)$$

### 2.3.2 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr/mn) [Gho,Dib-19]

$$\Omega_{mec} = G\Omega_{turb} \rightarrow G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turb}} \quad (2.21)$$

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

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{aer} \rightarrow G = \frac{C_{aer}}{C_{mec}} \quad (2.22)$$

où  $G$  est le rapport de multiplication,  $C_{mec}$  le couple mécanique sur l'axe du générateur (mesuré en  $N.m$ ).

### 2.3.3 Modélisation de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique exercé sur l'arbre du rotor de l'éolienne  $C_{mec}$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  [Lou-16] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} - C_{em} - B\Omega \quad (2.23)$$

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_t$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie totale  $J$  est constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice  $J_g$ .

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (2.24)$$

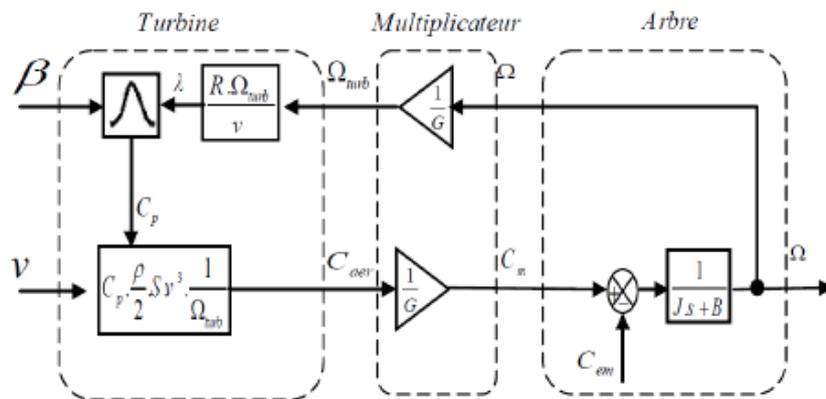


FIGURE 2.19 – Modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine

### 2.3.4 Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable

Pour extraire de manière efficace la puissance du vent, le fonctionnement de l'éolienne doit être exploité selon 4 zones différentes comme le montre la figure (2.20) [Che-15] :

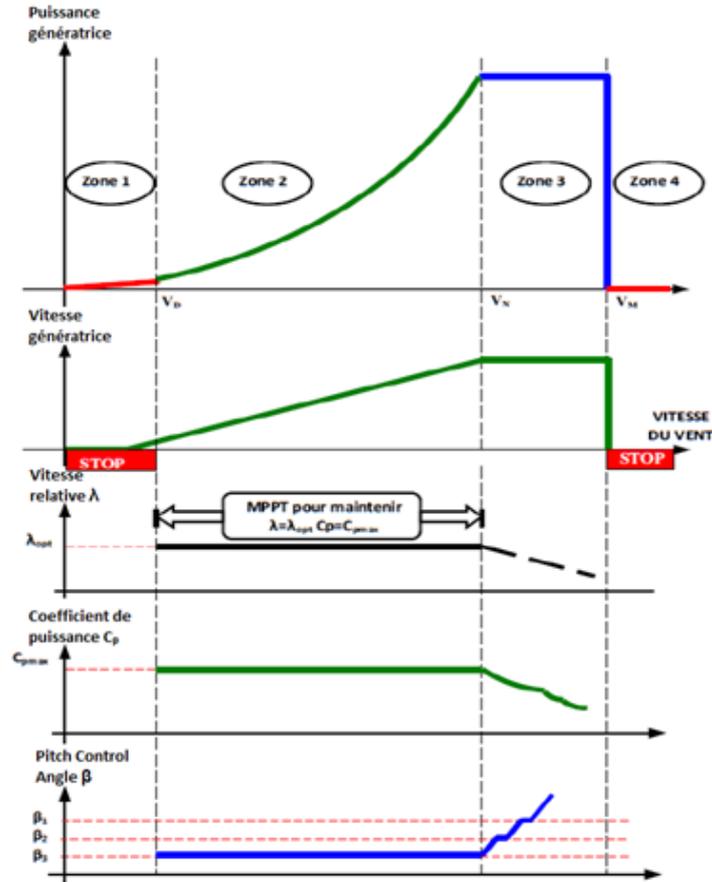


FIGURE 2.20 – Les zones de fonctionnement

Nous nous intéressons par la suite à la deuxième zone pour extraire le maximum de puissance.

### 2.3.5 Technique d'extraction du maximum de puissance

Notre but est d'exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent afin d'extraire le maximum de puissance de l'éolienne. Pour cela, on va développer une stratégie de commande nommée le MPPT en se basant sur la deuxième zone .

On distingue deux familles de structure :

- Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.
- Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Nous nous intéressons dans ce qui suit à la commande MPPT avec asservissement de vitesse mécanique.

### 2.3.6 Commande MPPT avec asservissement de vitesse

Cette stratégie consiste à maintenir la vitesse de rotation de la génératrice à une vitesse de consigne. Cette dernière est maximisée si le coefficient de puissance est maximisé. Pour cela, il faut optimiser la vitesse relative  $\lambda$  [Mas-18].

On va utiliser la loi linéaire pour la régulation de la vitesse mécanique. Selon [Lou-16] :

$$C_{em}^* = Reg(\Omega_{mec}^* - \Omega_{mec}) \quad (2.25)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{opt}$  (on fixe l'angle de calage  $\beta = 2$ ).

La vitesse mécanique de référence  $\Omega_{mec}^*$  peut être la vitesse de la turbine de référence en prenant en compte le gain du multiplicateur [Mas-18] [Lou-16] :

$$\Omega_{mec}^* = G \Omega_t^* \text{ avec } \Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} V_{vent}}{R} \quad (2.26)$$

On représente alors le schéma bloc de cette commande dans la figure (2.21) :

#### Régulateur PI :

La fonction de transfert liant la vitesse au couple est :

$$\frac{\Omega}{C_{em} - C_{mec}} = \frac{1}{Js + B} \quad (2.27)$$

Le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse est illustré dans la figure (2.22) : La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F_{BO}(s) = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + Bs} \quad (2.28)$$

et en boucle fermée comme :

$$F_{BF}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + \frac{k_p B}{J} s + \frac{K_i}{J}} \quad (2.29)$$

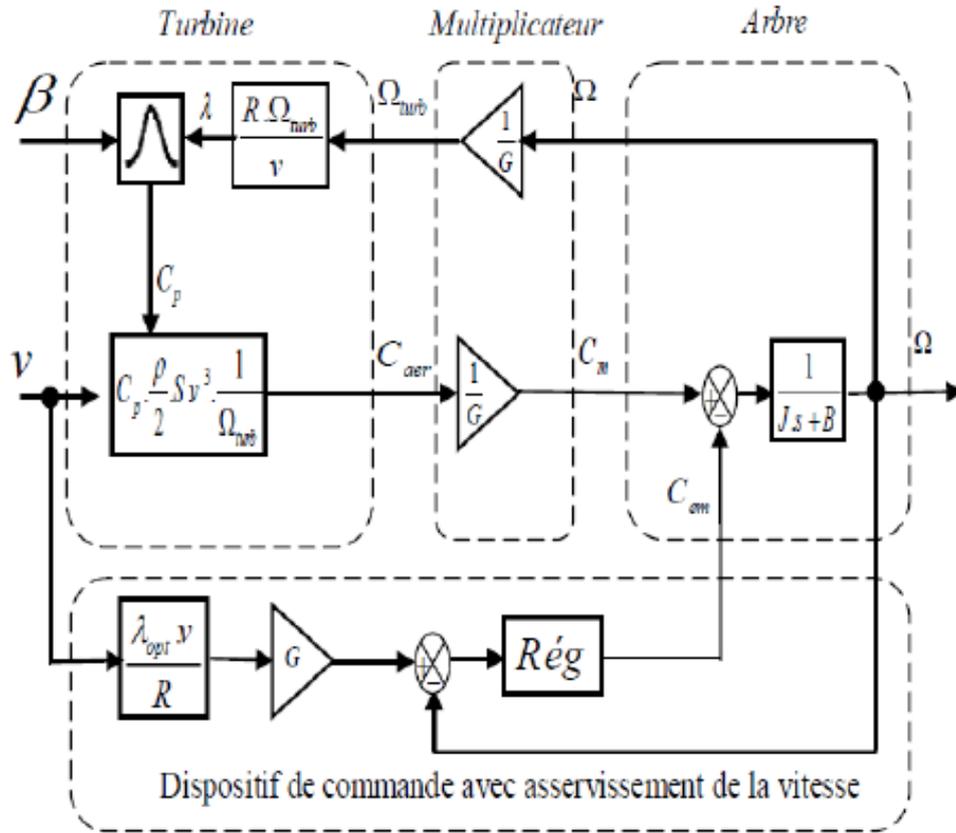


FIGURE 2.21 – Schéma bloc de la commande avec asservissement de la vitesse

Connaissant la forme canonique :

$$F(s) = \frac{2\xi\omega_n + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.30)$$

où  $\xi$  est le coefficient d'amortissement et  $\omega_n$  la Pulsation propre.

et par identification, nous avons :

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = \frac{K_p s + B}{J} \\ \omega_n^2 = \frac{K_i}{J} \end{cases} \quad (2.31)$$

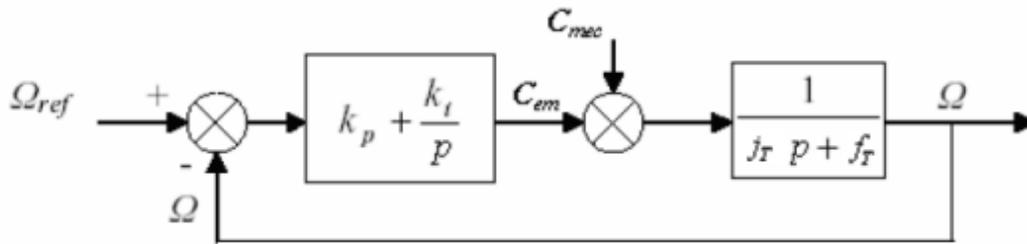


FIGURE 2.22 – Schéma fonctionnel du régulateur PI [Kel-11]

Nous obtenons alors les relations de  $K_p$  et  $K_i$  :

$$\begin{cases} K_p = 2\xi\omega_n J - B \\ k_i = \omega_n^2 J \end{cases} \quad (2.32)$$

On prend la valeur du coefficient d'amortissement  $\xi = 0.7$  afin d'optimiser les performances dynamiques et la stabilité du système [lou-16].

## 2.3.7 Modélisation de la MADA :

### 2.3.7.1 Présentation de la MADA

La machine à double alimentation (MADA) est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie. Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux cotés de la machine, ce qui constitue un avantage principal, surtout dans les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et où le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association de convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois.[Kel-11][Gho,Dib-19]

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique, mais la grande différence réside dans le fait que dans la MADA, ce n'est plus la vitesse qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.[Boy-06]

Effectivement, la machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être un générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet à gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [Dje,Mel-20 ]

La figure (2.23) montre l'allure de la caractéristique mécanique couple/vitesse de la machine asynchrone à double alimentation

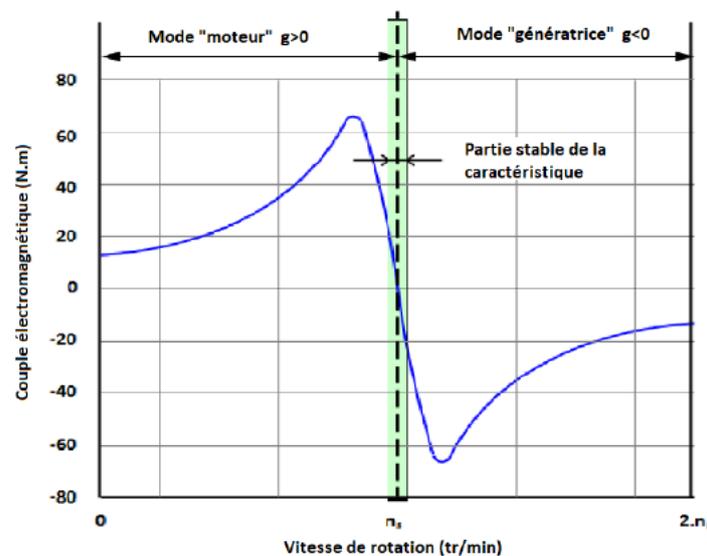


FIGURE 2.23 – Caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [Dje,Mel-20]

De la figure, nous constatons que la génératrice asynchrone à double alimentation peut fonctionner dans différents régimes, selon la valeur du glissement :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s} \quad (2.33)$$

tel que :  $f_s = f_r + f_m$

### 2.3.8 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices [Kel-11].

### 2.3.8.1 Hypothèses simplificatrices

Afin d'avoir des résultats précis et des calculs simplifiés, on repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes [Kel-11] [Lou-16] :

- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- les pertes fer dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligées .
- la machine présente une parfaite symétrie, tant au stator et qu'au rotor.
- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

Pour modéliser la machine représentée dans la figure (2.24, nous allons écrire les équations en triphasé des différentes grandeurs, puis nous appliquerons la transformation de Park pour passer en biphasé.

Finalement, on développe un algorithme de commande de la machine par un onduleur.

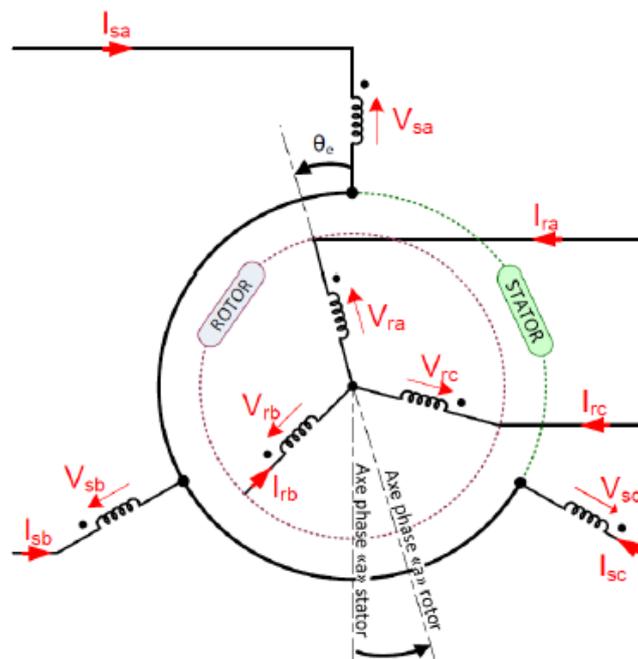


FIGURE 2.24 – Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA [Kra-13]

### 2.3.8.2 Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = R_s[I_s] + \frac{d\phi_s}{dt} \\ [V_r] = R_r[I_r] + \frac{d\phi_r}{dt} \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Les flux statorique et rotorique s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{rs}][I_r] \\ [\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{array} \right. \quad (2.35)$$

Après l'utilisation de la transformation de PARK, nous allons présenter les équations de la MADA exprimées dans le repère  $dq$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \phi_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_r \phi_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{array} \right. \quad (2.37)$$

- L'équation mécanique :

$$C_{em} = C_r + j \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (2.38)$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (i_{rq} \cdot \phi_{sd} - i_{rd} \cdot \phi_{sq}) \quad (2.39)$$

Dans un repère biphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{qs} - V_{ds} I_{ds} \end{array} \right. \quad (2.40)$$

### 2.3.8.3 Association de la MADA à un onduleur MLI

#### a) Onduleur de tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur qui permet d'obtenir une tension alternative de fréquence et valeur efficace fixe ou réglable à partir d'une source de tension continue. Pour

sa commande, on utilise la commande par modulation de Largeur d'impulsions (MLI) dite sinus – triangle, cette technique consiste à comparer un signal triphasé sinusoïdal de référence appelé modulatrice à une porteuse triangulaire de fréquence  $F_p$  et d'amplitude  $V_p$ , notant que  $F_p$  doit être largement supérieure à la fréquence du signal sinusoïdal [Dje,Mel-20] [Sef,Bel-20]. [Kra-13]

Nous associons notre génératrice du côté rotor à un onduleur à trois bras ; chaque bras contient deux interrupteurs du type MOSFET commandés à l'amorçage et au blocage.

La tension de référence  $V_{ra}^*$  est obtenue par les courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  après l'application de la transformation inverse de Park puis, comparée avec la porteuse triangulaire [Kra-13].

$$\begin{cases} Si V_{ra}^* > V_p \Rightarrow V_{aN} = U \\ Si V_{ra}^* < V_p \Rightarrow V_{aN} = -U \end{cases} \quad (2.41)$$

La relation entre les tensions de références et les tensions de sortie de l'onduleur est [Kra-13] :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Il y a deux paramètres caractérisant la commande [Dje,Mel-20] [Lou-16] :

**L'indice de modulation**  $m$  qui représente le rapport entre la fréquence de modulation et la fréquence de référence.

$$m = \frac{F_p}{F} \quad (2.43)$$

**le coefficient de réglage**  $r$  représente le rapport entre l'amplitude du signal de référence et la valeur crête de la porteuse.

$$r = \frac{V_N}{V_p} \quad (2.44)$$

### 2.3.8.4 Commande vectorielle

#### a) Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle permet un contrôle indépendant des puissances active et réactive délivrées par la MADA, en commandant séparément le couple électromagnétique et le flux de la machine asynchrone. Son principe est basé sur le choix d'un repère de référence lié aux flux que l'on désire orienter.[Dje,Mel-20]

En effet, le référentiel lié au champ tournant peut être orienté de telle sorte que l'axe  $d$  de ce référentiel coïncide avec un des flux de la machine (statorique, rotorique ou d'entrefer). Ces différentes orientations nous permettent d'obtenir plusieurs manières de contrôler la machine asynchrone via les convertisseurs.

Selon le choix du référentiel, les conditions d'orientation sont exprimées par :

— **Orientation du flux rotorique suivant l'axe  $d$  :**

$$\varphi_{rq} = 0 \Rightarrow \varphi_r = \varphi_{rq} \quad (2.45)$$

— **Orientation du flux statorique suivant l'axe  $d$  :**

$$\varphi_{sq} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sd} \quad (2.46)$$

— **Orientation du flux statorique suivant l'axe  $q$  :**

$$\varphi_{sd} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sq} \quad (2.47)$$

Cela permet de simplifier les équations des flux et du couple électromagnétique de la MADA en changeant de repère.

### 2.3.9 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

#### A. Tension rotorique

$$\begin{cases} V_{rd} = \sigma.L_r.\frac{di_{rd}}{dt} + R_r.i_{rd} - \sigma.L_r.\omega.i_{rq} + \frac{M_{sr}}{L_s}\frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{rq} = \sigma.L_r.\frac{di_{rq}}{dt} + R_r.i_{rq} - \sigma.L_r.\omega.i_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_s}\omega_r\frac{d\phi_{sd}}{dt} \end{cases} \quad (2.48)$$

On a :

$$\begin{cases} fem_d = -\sigma.L_r.\omega.i_{rq} + \frac{M_{sr}}{L_s}\frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ fem_q = -\sigma.L_r.\omega.i_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_s}\omega_r\frac{d\phi_{sd}}{dt} \end{cases} \quad (2.49)$$

Ce qui rend l'équation (2.48) :

$$\begin{cases} V_{rd} = \sigma.L_r.\frac{di_{rd}}{dt} + R_r.i_{rd} + fem_d \\ V_{rq} = \sigma.L_r.\frac{di_{rq}}{dt} + R_r.i_{rq} + fem_q \end{cases} \quad (2.50)$$

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$\begin{cases} (\sigma.L_r.P + R_r).i_{rd} = V_{rd} - fem_d \\ (\sigma.L_r.P + R_r).i_{rq} = V_{rq} - fem_q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{\sigma.L_r.P + R_r}(V_{rd} - fem_d) \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma.L_r.P + R_r}(V_{rq} - fem_q) \end{cases} \quad (2.51)$$

La figure (2.25) illustre le schéma bloc simplifié du modèle des courants statoriques :

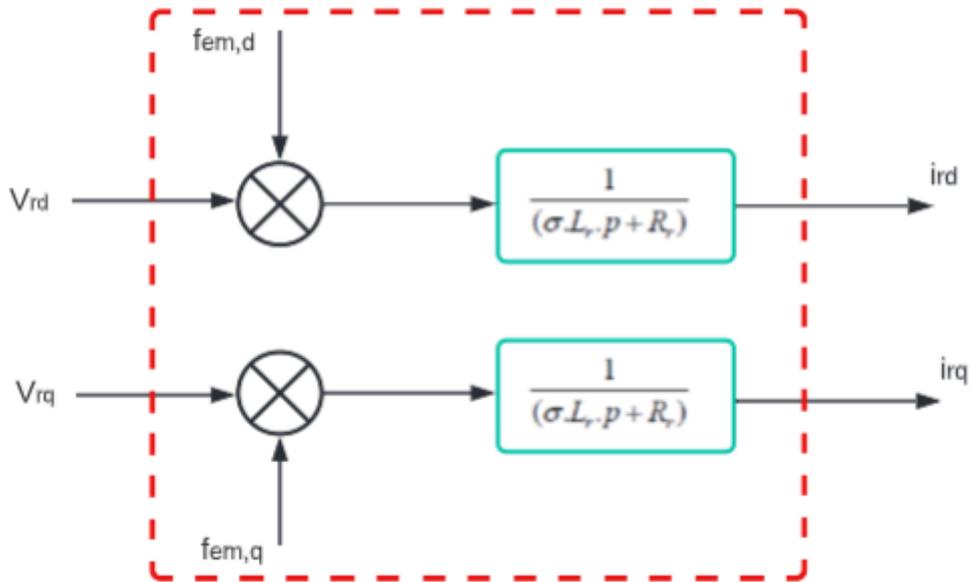


FIGURE 2.25 – Modèle simplifié des courants rotoriques de la MADA

### B. Puissance statorique

Les puissances statoriques de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} P_s = v_s \cdot i_{sq} \\ Q_s = v_s \cdot i_{sd} \end{cases} \quad (2.52)$$

D'après les relations du flux et l'orientation du flux statorique, on écrit :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ 0 = L_s \cdot i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \end{cases} \quad (2.53)$$

Donc :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd} - M_{sr}i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr}i_{rq}}{L_s} \end{cases} \quad (2.54)$$

En remplaçant (2.28) dans (2.30), on obtient les puissances en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (i_{rd} - \frac{\phi_{sd}}{M_{sr}}) \end{cases} \quad (2.55)$$

La figure (2.26) illustre le modèle simplifié des puissances statoriques de la MADA exprimé en schéma bloc :

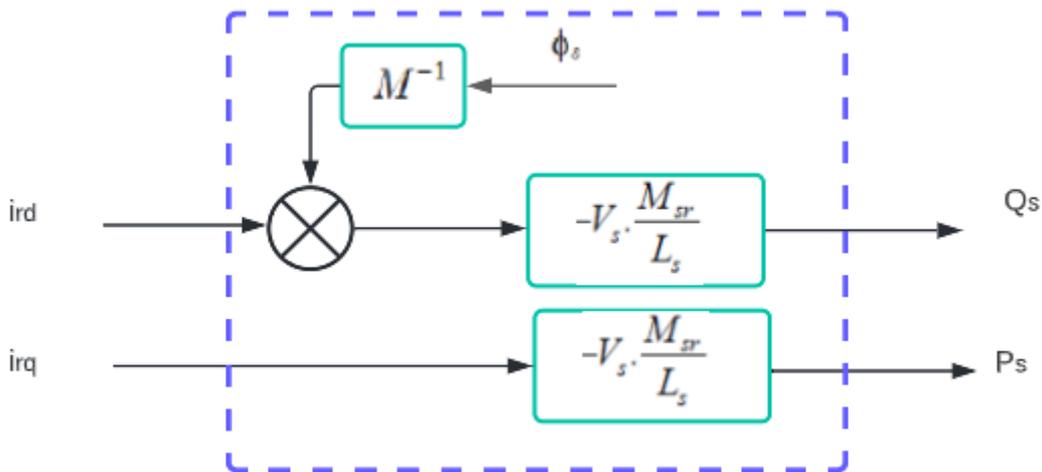


FIGURE 2.26 – Modèle simplifié des puissances statoriques de la MADA

**C. Modèle simplifié de la MADA avec orientation du flux statorique**

D’après les modèles illustrés précédemment dans les figures (2.25) et (2.26) on obtient le modèle simplifié de la MADA concernant les enroulements rotoriques :

**D. Les termes de couplage**

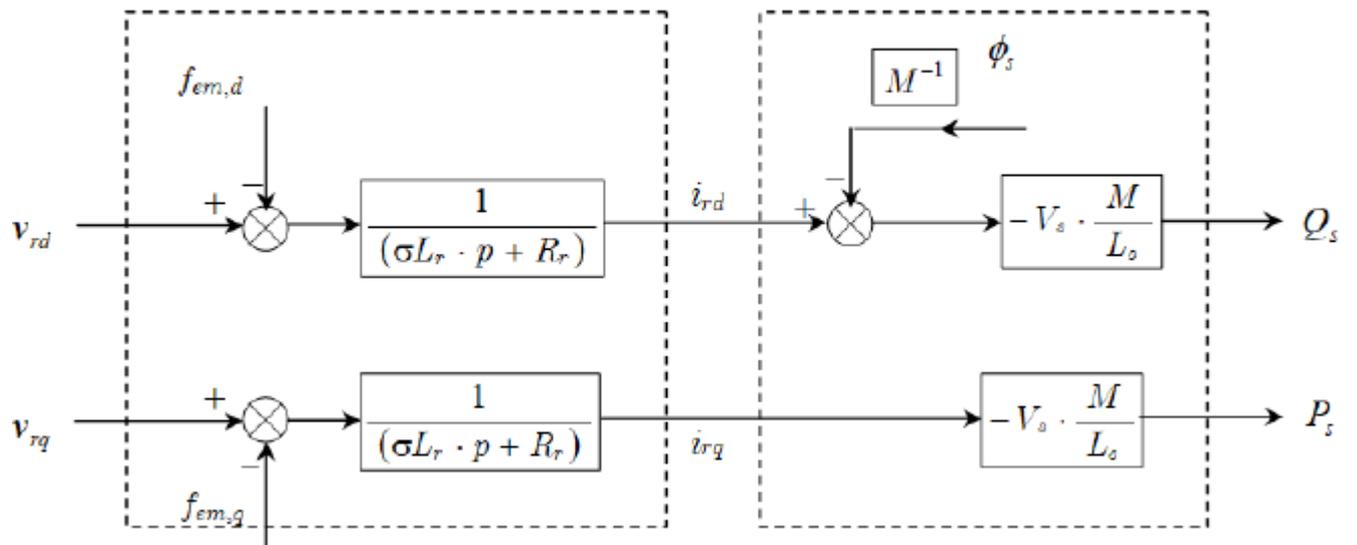


FIGURE 2.27 – Modèle réduit du rotor de la MADA

Comme cela est indiqué précédemment, le flux statorique est constant, puisque les tensions de réseau sont supposées stables, d'où :

$$\frac{d\phi_{sd}}{dt} = 0 \quad \text{avec} \quad \phi_{sd} = \frac{v_s}{\omega_s} \quad (2.56)$$

Les termes de couplage deviennent :

$$\begin{cases} fem_d = -g\sigma l_r \omega_s i_{rq} \\ fem_q = +g\sigma l_r \omega_s i_{rd} + g \frac{M_{sr}}{L_s} V_{sq} \end{cases} \quad (2.57)$$

### 2.3.10 Commande directe des puissances active et réactive

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. L'intérêt que présente cette méthode est que sa mise en œuvre est simple et qu'elle consiste à placer une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur PI, tout en compensant

les termes de perturbation, et en négligeant les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur de glissement. [Gho,Dib-19]

La figure (2.28) représente le schéma bloc de la commande directe des puissances de la MADA :

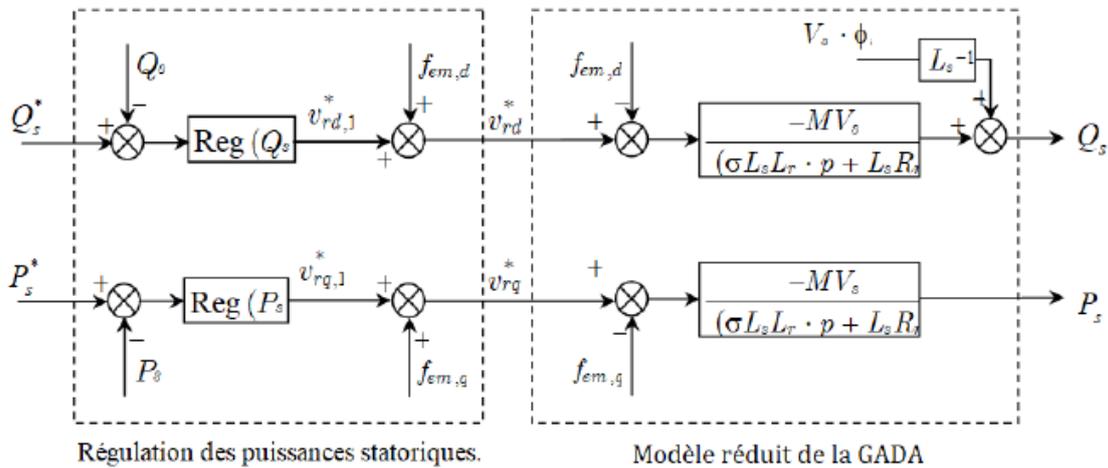


FIGURE 2.28 – Modèle de la commande directe des puissances de la MADA [Dje,Mel-20]

### 2.3.10.1 Dimensionnement du régulateur PI

Le correcteur proportionnel-intégral est une combinaison des deux actions proportionnelle et intégrale. Il a pour effet d’assurer la rapidité du système à régler et d’éliminer l’erreur statique entre la valeur mesurée et la valeur de référence [Kel-11]

La figure (2.29) représente la boucle de régulation utilisée pour le contrôle des puissances active et réactive [Bek-14] : Soit la fonction de transfert du régulateur PI :

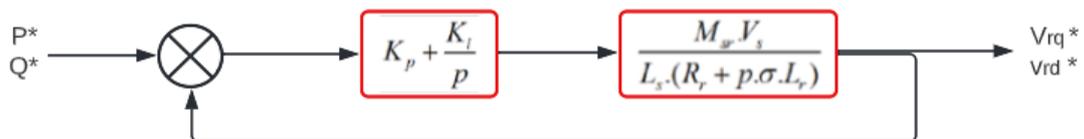


FIGURE 2.29 – Schéma de régulation des puissances  $P_s$  et  $Q_s$

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \tag{2.58}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte FTBO de la figure (2.29) est :

$$FTBO(p) = (k_p + \frac{k_i}{p}) \frac{M_{sr} \cdot V_s}{L_s \cdot (R_r + p\sigma \cdot T_r)} \quad (2.59)$$

Nous faisons sortir  $\frac{k_i}{p}$  comme facteur commun pour obtenir :

$$FTBO(p) = \frac{k_i}{p} (p \cdot \frac{k_p}{k_i} + 1) \cdot \frac{M_{sr} \cdot V_s / L_s \cdot R_r}{p \cdot \sigma \cdot T_r + 1} \quad (2.60)$$

tel que :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

On applique la condition :

$$\frac{k_p}{k_i} = \sigma \cdot T_r \quad (2.61)$$

Pour obtenir, après la compensation du pole, l'équation finale de la FTBO :

$$FTBO(p) = \frac{k_i M_{sr} \cdot V_s}{p L_s \cdot R_r} \quad (2.62)$$

Ensuite, pour avoir un comportement d'un système du premier ordre où la fonction de transfert s'écrit sous la forme [Bek-14] :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (2.63)$$

la fonction de transfert en boucle fermée FTBF de la figure (2.29) doit être écrite sous la forme :

$$FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)} = \frac{1}{1 + p \frac{k_i M_{sr} \cdot V_s}{L_s \cdot R_r}} \quad (2.64)$$

Par analogie, nous trouvons :

$$\tau = \frac{k_i M_{sr} \cdot V_s}{L_s \cdot R_r} \quad (2.65)$$

De l'expression (2.37) et l'expression (2.41), nous avons :

$$\begin{cases} K_p = k_i \cdot \sigma \cdot T_r = \frac{\sigma L_s L_r}{\tau M_{sr} \cdot V_s} \\ K_i = \frac{\sigma L_s R_r}{\tau M_{sr} \cdot V_s} \end{cases} \quad (2.66)$$

### 2.3.11 Résultat de la simulation

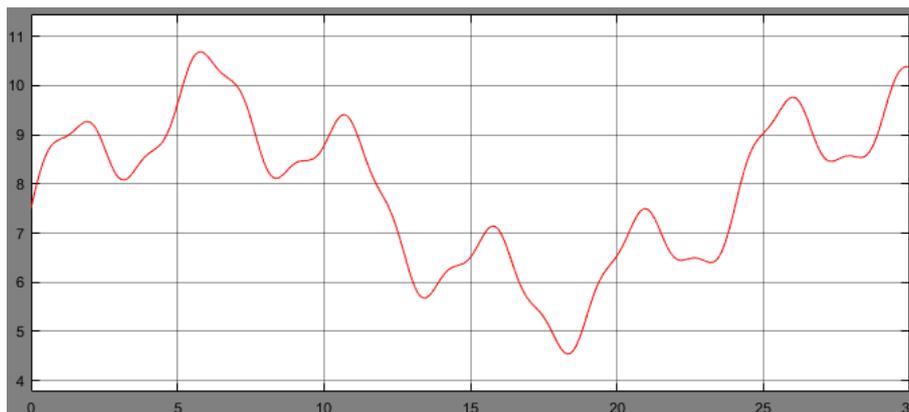
Les simulations sont effectuées dans le logiciel MATLAB Simulink/Simpower System dans le but d'examiner les performances de la génératrice asynchrone à double alimentation ainsi que la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

Les puissances actives et réactives de référence sont prises dans cette simulation comme des échelons.

nous prenons un profil de vent donné par la relation suivante [Lou-16] :

$$V_{vent} = 7.5 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (2.67)$$

On note que les paramètres de la génératrice asynchrone à double alimentation seront présentés dans l'annexe.



**FIGURE 2.30 – Allure du profil du vent**

a) puissance statorique active

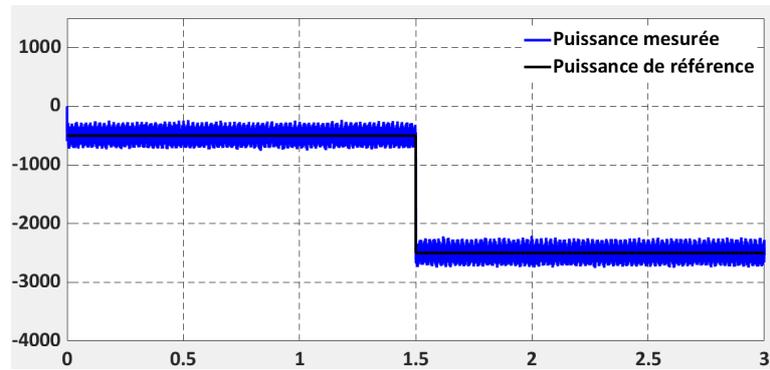


FIGURE 2.31 – Allure de la puissance statorique active

b) Puissance statorique réactive

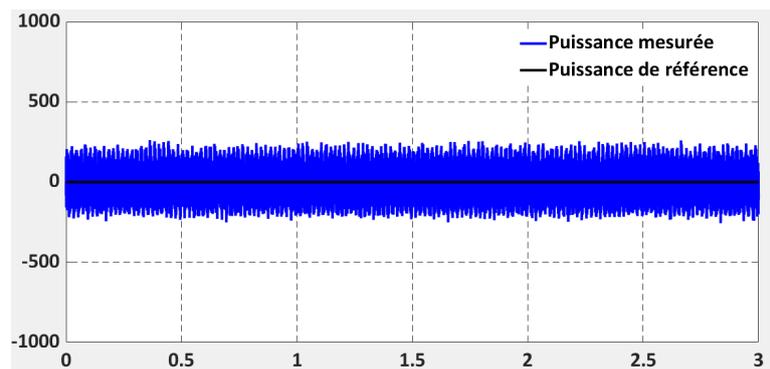


FIGURE 2.32 – Allure de la puissance statorique réactive

c) Courants rotorique

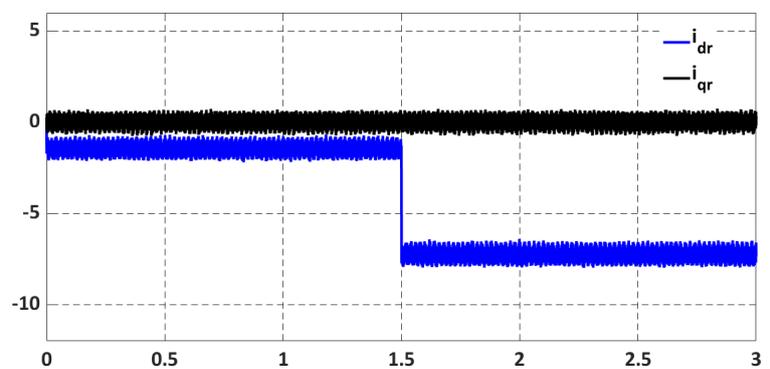
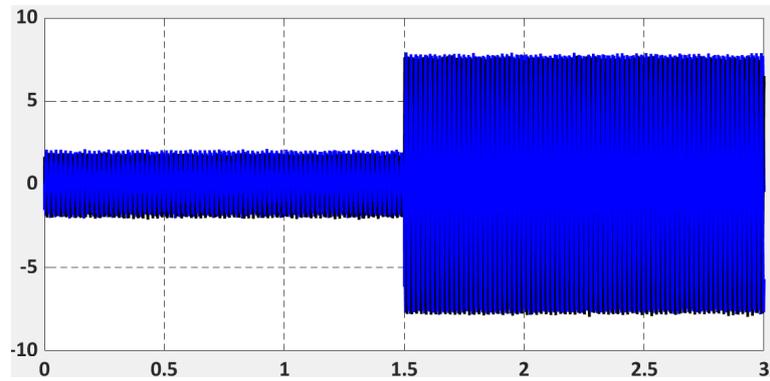


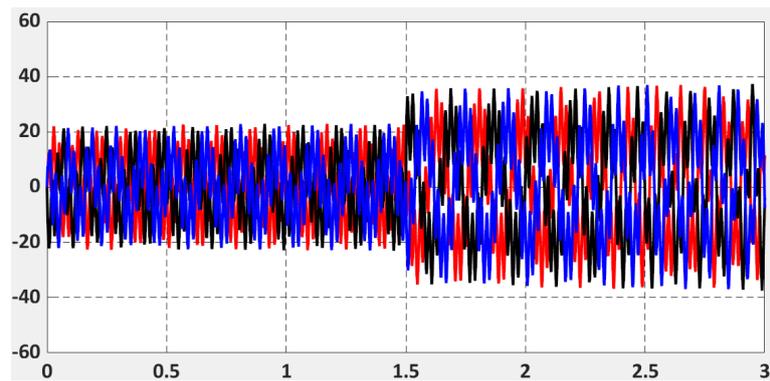
FIGURE 2.33 – Allure des courants rotorique

**d) Courant statorique réel  $I_{abc}$**



**FIGURE 2.34 – Allure du courant statorique réel**

**e) Courant rotorique réel  $I_{abc}$**



**FIGURE 2.35 – Allure du courant rotorique réel**

**f) Vitesse électrique**

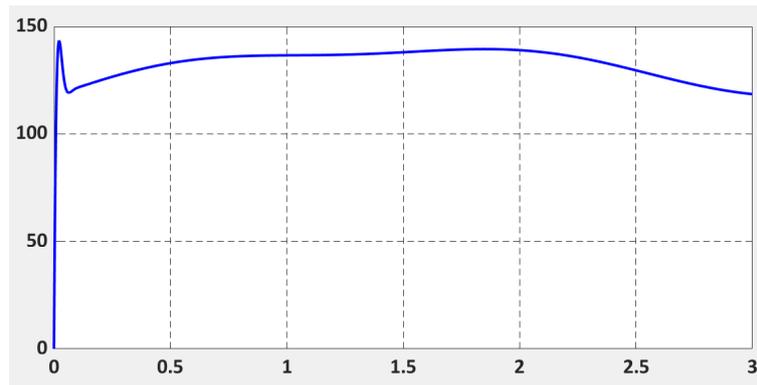


FIGURE 2.36 – Allure de la vitesse électrique

### 2.3.11.1 Interprétations

Les figures(2.31)(2.32)(2.33)(2.34)(2.35) et (2.36), présentent les résultats de la simulation du générateur éolien à base de la MADA en utilisant la commande directe des puissances active et réactive.

Après l'observation des graphes, nous pouvons remarquer le bon découplage au réglage des puissances actives et réactives et une bonne poursuite des valeurs commandées à leurs consignes avec un temps de réponse relativement faible.

D'autre part, on remarque que la composante directe du courant rotorique et la puissance active ont la même allure ainsi que la composante en quadrature du courant et la puissance réactive. Ce qui confirme les équations donner auparavant ( 2.55).

## 2.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation des systèmes photovoltaïque et éolien, séparément. Pour le système pv, nous avons utilisé un hacheur survolteur et une commande MPPT afin d'optimiser la puissance délivrée par un panneau solaire.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons simulé une chaîne éolienne composée d'une turbine avec une commande MPPT avec asservissement de vitesse, et une génératrice à double alimentation à base de la commande directe des puissances active et réactive

---

# **Contrôle d'un système hybride éolien-photovoltaïque**

## **3.1 Introduction**

Pour optimiser les systèmes de production d'électricité, nous optons pour la combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables (hydraulique, photovoltaïque, éolienne). Ce couplage a pour avantage d'accroître la fiabilité du système et réduire le coût de production.

Le système hybride étudié est composé de deux sources d'énergie renouvelables, en l'occurrence source photovoltaïque et source éolienne.

Nous commençons par la définition du système hybride et son principe de fonctionnement. Ensuite, nous présenterons quelques généralités sur le système hybride pour clôturer ce travail par une simulation de couplage des deux chaînes (photovoltaïque-éolien) en parallèle.

## **3.2 Généralités sur le système hybride**

### **3.2.1 Définition du système hybride**

Un système hybride à source d'énergie renouvelable (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.(panneaux solaires, éoliennes, les petites turbines hydrauliques etc..) de manière à augmenter la production d'énergie électrique pour une meilleure disponibilité. Par exemple, la combinaison des deux sources éolienne et photovoltaïque peut permettre à avoir une production plus constante car l'activité éolienne est généralement faible dans les journées ensoleillées, par contre les journées nuageux et la nuit sont caractérisées par des vents forts.[Bor-15] [Dje,Mel-20] [Fel-12].

### **3.2.2 Principaux composants du système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque**

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien sont généralement composés de [Bou-15]

- Un système générateur (photovoltaïque + éolien).
- Un système de régulation.
- Un système du stockage.
- Des équipements de puissance.
- Une charge.

Il est indispensable que la tension soit la même pour les deux générateurs [Bou-15].

## **3.3 Avantages et inconvénients du système hybride**

### **3.3.1 Avantages**

- Le système hybride ne dépend pas d'une seule source
- Il est capable de satisfaire des charges évolutives.
- Il est caractérisé par sa simplicité d'exploitation.
- Travaux de maintenance et de révision réduits.
- Faibles coûts par rapport au cycle de vie.

### **3.3.2 Inconvénients**

- Coût du capital est relativement élevé par rapport au groupe diesel.
- Nécessité du stockage avec des batteries et du conditionnement de l'électricité.

## **3.4 Configuration du système hybride**

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable. On peut distinguer trois structures parmi d'autres, à savoir : architecture

à bus courant continu (CC), architecture à bus courant alternatif (CA) et architecture mixte à bus courant continu/courant alternatif.[Bor-15][Dje,Mel-20]

### **3.4.1 Architecture à bus courant continu (CC)**

Dans l'architecture d'un système hybride à bus courant continu la puissance fournie par chaque source ainsi que les composants du stockage sont connectés à un bus à courant continu à travers des convertisseurs de puissance, un onduleur est raccordé par la suite afin d'alimenter les charges à courant alternatif [Sad-12][Dje,Mel-20].

L'avantage de cette architecture se résume dans la simplicité du modèle et de sa commande. Le rendement du système est faible à cause de l'énergie perdue dans les convertisseurs et les batteries [Tra-16][Dje,Mel-20].

### **3.4.2 Architecture à bus courant alternatif (CA)**

La figure (ref) illustre l'architecture d'un système hybride à bus CA. Selon la figure nous constatons que la puissance fournie par la source est connectée à un bus à courant alternatif. Les générateurs à courant alternatif sont connectés directement au bus CA sous la nécessité des convertisseurs( à reformuler ! ), par contre les générateurs à courant continu sont raccordés à des onduleurs. Les batteries sont aussi à leur tour liées au bus CA à travers un convertisseur bidirectionnel [Tra-16] [Dje,Mel-20].

### **3.4.3 Architecture à bus mixte CC/CA**

La configuration du système hybride à bus courant continu et courant alternatif peut alimenter une partie de la charge à courant alternatif directement à travers la source alternative ce qui augmente le rendement du système. Les deux bus doivent être reliés à des convertisseurs bidirectionnels. Dans cette configuration l'énergie stockée dans les batteries intervient en cas de pic de charge. [Dje,Mel-20]

### **3.5 Classification des systèmes hybrides selon le régime de fonctionnement**

Il existe plusieurs critères pour classer les systèmes hybrides. Nous allons présenter dans cette section la classification des systèmes hybrides selon le régime du fonctionnement.

Nous distinguons deux groupes dans la classification selon le mode du fonctionnement ; le premier regroupe les systèmes hybrides fonctionnant en parallèle avec le réseau électrique, nommés systèmes connectés au réseau, et qui servent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

Le second groupe réunit les systèmes hybrides qui fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ce type de système sert à satisfaire les besoins des consommateurs situés dans les sites éloignés du réseau électrique comme les îles, les villages isolés, les panneaux de signalisation routière, les refuges dans les montagnes, etc. [Bou-15] [Dje,Mel-20].

### **3.6 Système du stockage**

Les systèmes hybrides sont généralement équipés de systèmes du stockage afin de garantir une alimentation de la charge à une durée relativement longue (des heures ou même des jours) ou pour éliminer les fluctuations dans le cas d'un système hybride connecté au réseau [Bou-15][Dje,Mel-20].

Le système de stockage est généralement à base des batteries qui sont d'habitude de type plomb-acide, mais il existe aussi le stockage par pompage d'eau, par volant d'inertie ou le stockage d'hydrogène comme forme de stockage de l'énergie électrique.[Dje,Mel-20]

### **3.7 Convertisseurs**

Dans un système hybride, plusieurs convertisseurs sont impliqués dans la chaîne de transformation de l'énergie, et ce, à cause de l'existence de plusieurs formes de courant. Nous pouvons distinguer trois types des convertisseurs : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [Bou-15][Dje,Mel-20].

Les redresseurs convertissent le courant alternatif en courant continu afin de pouvoir charger les batteries, ce type des convertisseurs sont des appareils simples, pas cher et ont un bon rendement [Bou-15][Dje,Mel-20].

Les onduleurs réalisent la conversion du courant continu en courant alternatif, les redresseurs et les onduleurs sont parfois remplacés par un seul appareil qui effectue les deux fonctions, appelé convertisseur bidirectionnel [Bou-15][Dje,Mel-20].

### **3.8 Résultats de simulation**

Nous allons choisir la configuration a bus courant continu (CC) pour notre étude du système hybride, l'ensemble de simulation est réalisé avec les conditions mentionnées dans les chapitres précédents (modèle du vent chapitre 2, éclairement et température chapitre 2) Les résultats obtenus de l'hybridation d'une éolienne de 3 *KW* avec 2 panneaux photovoltaïques de 245 W chacun sont présentés dans les figures (3.1)(3.2)(3.5)(3.3)(3.4).

a) La tension du système hybride

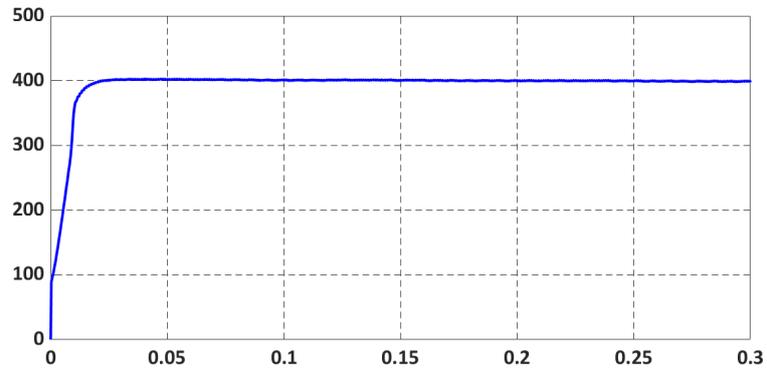


FIGURE 3.1 – Allure de la tension du système hybride

b) Le courant du système hybride

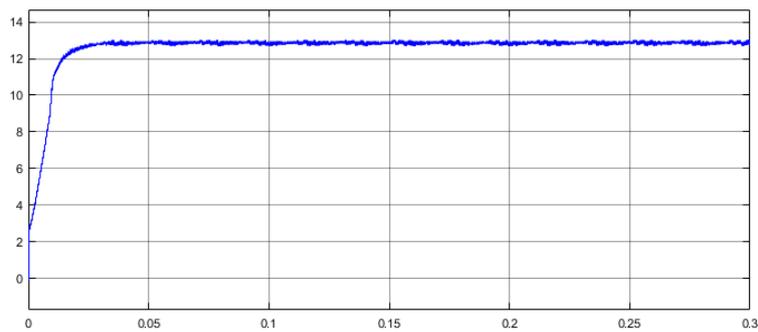


FIGURE 3.2 – Allure du courant du système hybride

c) La tension de sortie de l'onduleur

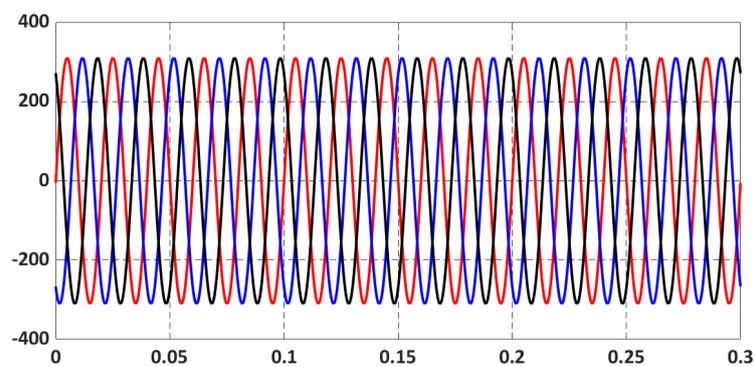
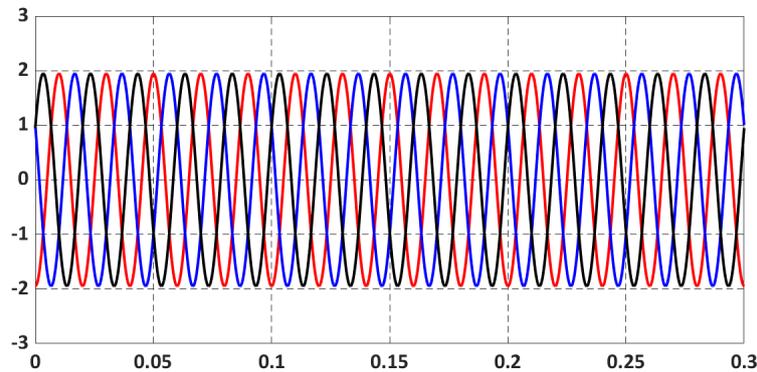


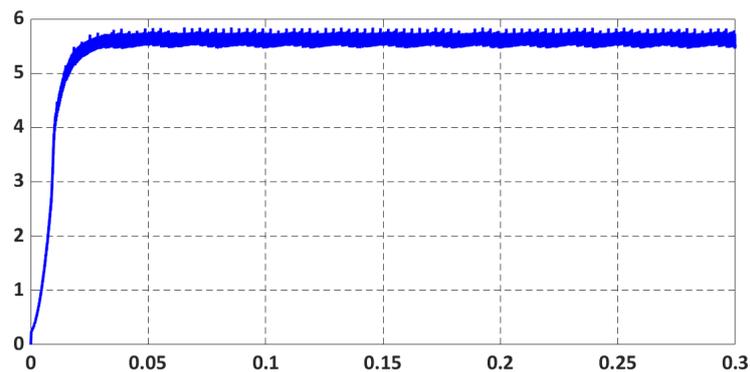
FIGURE 3.3 – Allure de la tension de sortie de l'onduleur

**d) Le courant de sortie de l'onduleur**



**FIGURE 3.4 – Allure du courant de sortie de l'onduleur**

**e) La puissance du système hybride**



**FIGURE 3.5 – Allure de la puissance du système hybride**

### 3.8.1 Interprétations des résultats

Les figures (3.1)(3.2)(3.5)(3.3)(3.4), représentent la tension et le courant du système hybride en continu ( à la sortie du bus CC) et la tension et le courant à la sortie de l'onduleur.

D'après la simulation, nous constatons que notre système effectue son travail d'une manière satisfaisante, on remarque que la tension et le courant ont une forme d'onde sinusoïdale qui a servie à éliminer les harmoniques et à augmenter la qualité de la puissance fournie au site alimenté.

Pour améliorer notre système en évitant la perte d'énergie et afin qu'il satisfasse toujours la charge quelles que soient les conditions climatiques, nous pouvons introduire un système de stockage à base des batteries et un contrôle du système hybride générale.

### **3.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la combinaison de deux sources d'énergie renouvelable, à savoir l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, nous avons présenté quelques généralités sur les systèmes hybrides. Pour étudier la combinaison des deux systèmes éolien-photovoltaïque, nous avons choisi l'architecture à bus courant continu à cause de sa simplicité, ensuite, nous avons raccordé notre système à un onduleur pour l'alimentation des charges alternatives. Enfin, nous avons effectué la simulation du système hybride dans l'environnement MA-TLAB/Simulink/Simpower System.

## Conclusion générale et perspectives

Le présent travail s'inscrit dans une démarche internationale d'intégration des énergies renouvelables dans le paysage énergétique, déclenchée ces deux dernières décennies afin de pallier le problème d'épuisement inévitable des ressources fossiles, avec tout ce qui s'ensuit comme changement climatique et pollution à risque pour la santé des humains.

Ce document traite de la modélisation et la simulation par MATLAB/SIMULINK d'un système énergétique hybride composé d'un générateur photovoltaïque et un générateur éolien. Le choix de ce type de système hybride est dicté par les avantages que représente la combinaison entre un système PV et un système éolien dans l'amélioration de la fiabilité de la production de l'électricité, puisque les deux systèmes sont de nature complémentaire.

Dans une première étape, nous avons effectué une simulation dans l'environnement MATLAB/Simulink/ Simpower afin d'évaluer les performances du système photovoltaïque composé de 2 panneaux photovoltaïques et un hacheur boost, en appliquant la commande MPPT avec la technique perturbation et observation pour la maximisation de la puissance.

Ensuite, La simulation du système éolien a été aussi faite dans le but d'examiner les performances de la turbine éolienne et la génératrice asynchrone à double alimentation ainsi que la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

La dernière étape consiste à combiner les deux systèmes par la simulation de leur fonctionnement en un seul système hybride. Les résultats obtenus sont alors discutés.

Alors, d'après la simulation effectuer sur MATLAB/Simulink, on a pu atteindre l'objectif de contrôler et de maximiser les deux systèmes (éolien et photovoltaïque). Enfin, notre système effectue son travail d'une manière satisfaisante, tel que la tension et le courant ont une forme

d'onde sinusoïdale d'une amplitude constante qui sert à éliminer les harmoniques et à améliorer la qualité de la puissance fournie au site alimenté.

Pour garantir la continuité de l'énergie, nous pouvons introduire un système de stockage à notre système.

Ce système ne dépend pas d'une seule source, mais de deux sources renouvelables, ce qui lui donne l'avantage du côté environnemental et du côté de la qualité d'énergie .

Comme perspectives, nous proposons de réaliser une étude de commande du système hybride, une réalisation pratique puis une implémentation en site isolé du système hybride étudié.



---

## BIBLIOGRAPHIE

- [Abd-11] R.Abdessamed, «Modélisation et simulation des machines électrique» ellipses edition, 2011.
- [Bek-14] Y. Bekakra, « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en réseaux électrique, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2014.
- [Boy-06] 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, France, 2006.
- [Che-15] A.Chemidi, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Mémoire de doctorat en électrotechnique commande des machines électriques, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 2015.
- [Dje,Mel-20] S.Djeraba , N.Melfi,« Etude et contrôle d'un système énergétique hybride éolien-photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur en électrotechnique,Ecole Supérieure de l'Energie Electrique et Energétique Oran, Algerie,2020.

- [Fel-19]** O. Fellah, H. Sadallah, « Optimisation de la production énergétique d'une chaîne photovoltaïque », Mémoire de master en électrotechnique, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2019.
- [Ghe-11]** T.Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion de réseau électrique, Apports des convertisseurs multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de mada » thèse de doctorat, école militaire polytechnique d'alger, 2011.
- [Gho,Dib-19]** S.Ghoudelbourk , D.Dib « Convertisseurs statiques dans une chaîne éolienne » Editions universitaires européennes, 2019 .
- [Hal-17]** A. Halouane, « Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque », Mémoire de master en énergétique et environnement, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2017.
- [HAM-08]** N.Hamdi« Modélisation et commande des génératrices éoliennes »,Mémoire de magister en électrotechnique, Université MENTOURI de CONSTANTINE, Algerie, 2008.
- [Has-10]** H. Hassini, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », Mémoire de magister en physique énergétique et matériaux, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2010.
- [Kas-06]** N. Kasbadji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat en physique énergétique et matériaux, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2006.
- [Kel-11]** B.Kelkoul«Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de magister en API, Université de TLEMCEM ,Algerie, 2011.

- [Ker-13]** A.Kerboua « Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique », UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Algerie,2013
- [Kra-13]** P. Krafczyk, « Modélisation et mise en oeuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA », Thèse de d'ingénieur en Electrotechnique, Ecole d'ingénieurs C.N.A.M, France, 2013.
- [Lou-16]** M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat en Modélisation et commande, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.
- [Mas-18]** S. Massoum, « contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat en commande électrique, université DJILLALI LIABES de Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2018.
- [Par-29]** R.H. Park, «Two-reaction theory of synchronous machines-generalized method of Analysis» AIEE Transactions, Vol 48, 3 July 1929.
- [Sai,Yah -14]** Y.Saidi,Y.Yahiaoui« Etude et réalisation d'une turbine éolienne », Mémoire de master en électromécanique,Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Algerie , 2014.
- [Sef,Bel-20]** A. Sefsaf,I. Beldjerba « Modélisation et contrôle d'un aérogénérateur connecté au réseau» mémoire d'ingénieur en électrotechnique, école supérieur en science appliquée, Tlemcen, Algerie,2020 .
- [Sla-11]** F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de magister encélectrotechnique, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2011.
- [Sol-19]** R.solar «L'energie solaire, des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain » Lavoisier tec&doc 2019
- [Tat,Ben-18]** F.TATI ,O.LAMOUDI « Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue »,Mémoire de MASTER en Electrotechnique Industrielle , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Algerie, 2018.

**[You-12]** A.A. Benabdellah, Y. Youbi, « Etude et réalisation d'un banc de simulation d'éolienne à base de MADA commandé et couplé au réseau triphasé », Mémoire de fin d'étude en électrotechnique, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2012.

# ANNEXE A

## A.1 Theorie de Betz

La théorie de Betz stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air.

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho s v_1^3 \quad (1)$$

Finalement, de l'association des équations précédentes on établit le schéma bloc de cette modélisation qui est montré dans la figure ci-dessous :

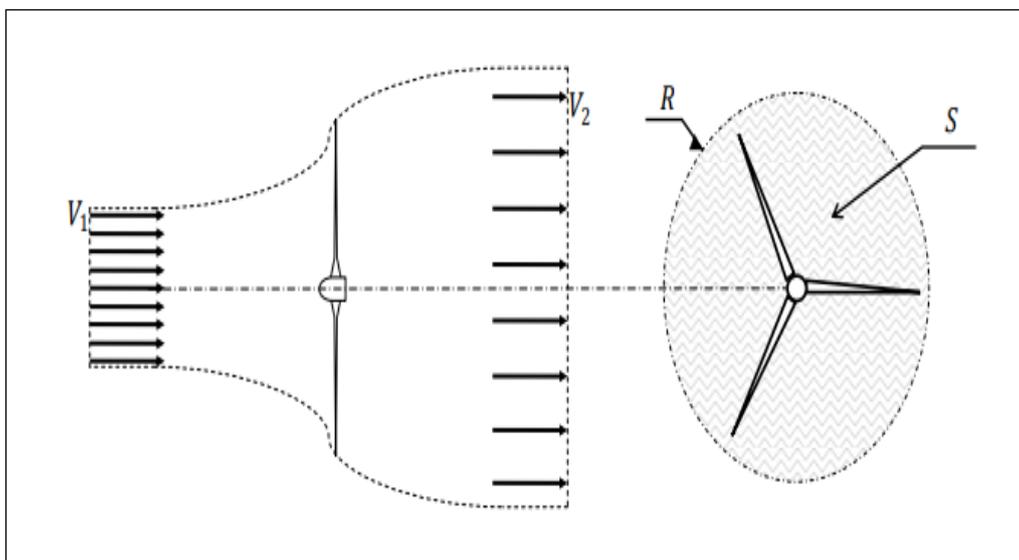


FIGURE A.1 – L'écoulement d'air à travers la surface du rotor de la turbine éolienne

## A.2 Transformation de park

Afin de faciliter la commande d'une machine asynchrone on doit réduire le nombre des grandeurs à contrôler et limiter les variations temporelles, pour y arriver, on fait appel à la transformation de Park [Par-29], cette dernière est une opération mathématique qui permet de passer d'un repère triphasé (ABC) de la machine à un repère biphasé (dq) : l'axe direct d et l'axe de quadrature arrière q, perpendiculaire et mutuellement couplés et l'angle entre eux est appelé angle de Park.

La matrice de Park et son inverse s'écrivent comme suit :

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

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

Le facteur  $\frac{2}{3}$  permet la conservation des amplitudes des courants, tensions et flux, par contre il faut introduire le facteur  $\frac{3}{2}$  pour conserver les puissances et les couples [Dje,Mel-20].

La relation entre les angles statoriques  $\theta_s$  et les angles rotoriques  $\theta_r$  :

$$\theta_s = \theta_r - \theta \quad (4)$$

Après dérivation :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

### A.3 Orientation du flux statorique

L'orientation du flux statorique sert à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine asynchrone identique à celui d'une machine à courant continu où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Le flux statorique tourne à la vitesse de synchronisme. Il est visualisé par le vecteur flux statorique qui donne une idée visuelle de la phase et de l'amplitude du flux .

Il existe plusieurs types d'orientation, à savoir l'orientation du flux rotorique, l'orientation du flux statorique et l'orientation du flux d'entrefer. Dans le cas de la MADA, nous avons envisagé d'établir une commande vectorielle par orientation du flux statorique sur l'axe d.[ker-13]

L'équation (2.11), en tenant compte de la relation (2.19), devient :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (i_{rq} \varphi_{sd}) \quad (6)$$

On constate que le problème du couplage entre les deux axes directs et en quadrature est éliminé et le couple électromagnétique ne dépend que de la composante directe du flux statorique.

la tension aux bornes d'une phase  $i$  du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{si} = R_s i_{si} + \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

tell que  $i = 1, 2, 3, \dots$

En négligeant la résistance du bobinage statorique  $R_s$  pour le cas des machines de moyenne et forte puissance généralement employées dans le domaine des la conversion de l'énergie éolienne, cette relation peut être réécrite sous la forme :

$$V_{si} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (8)$$

On suppose que les tensions du réseau soient stables, ce qui implique que le flux statorique est constant, on peut écrire alors [Lou-16] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (9)$$

La figure ci-dessous explique le principe de l'orientation du flux statorique.

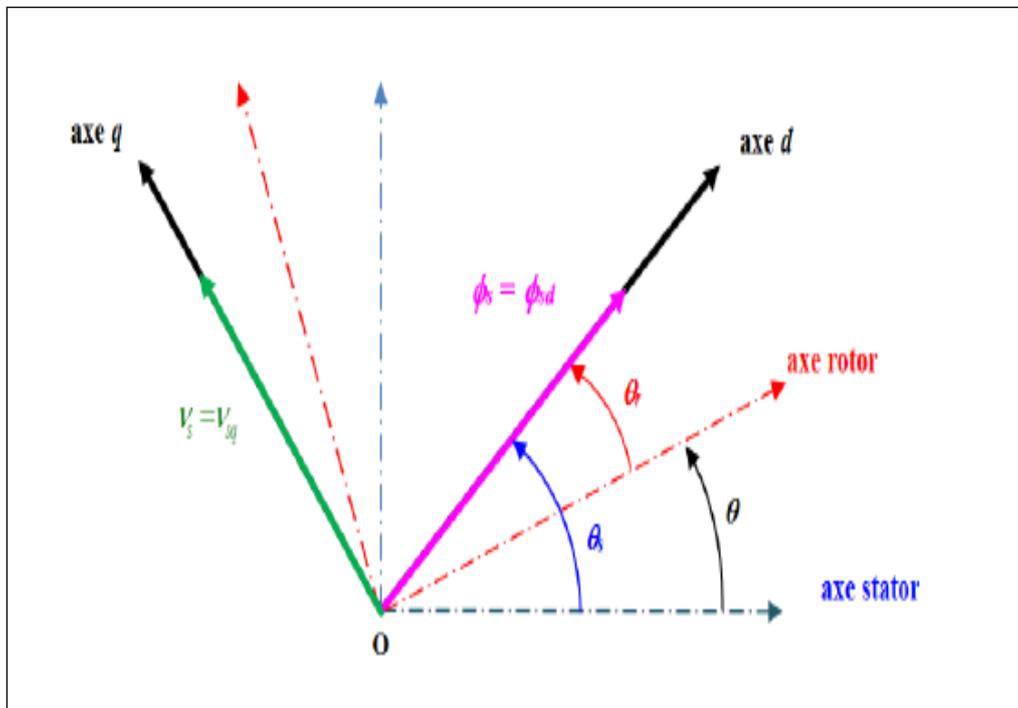


FIGURE A.2 – Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique

# ANNEXE B

## A.1 La chaîne éolienne

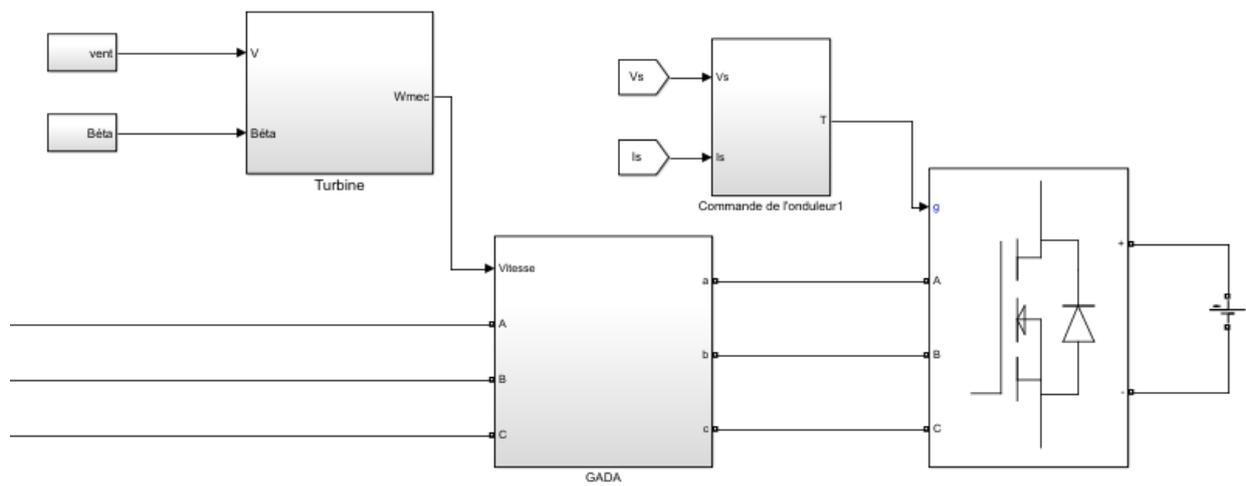


FIGURE A.1 – Diagramme de la chaîne éolienne

## A.1.1 La turbine éolienne

### A.1.1.1 MPPT avec asservissement de vitesse

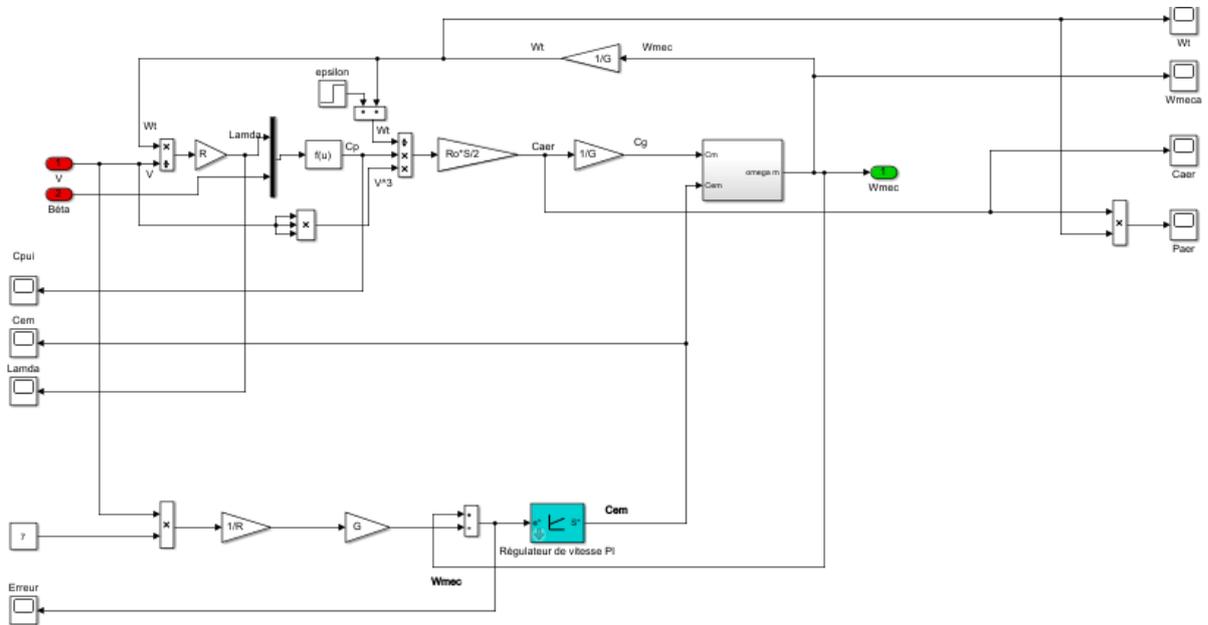


FIGURE A.2 – Diagramme de la turbine avec asservissement de vitesse

## A.1.2 La génératrice à double alimentation

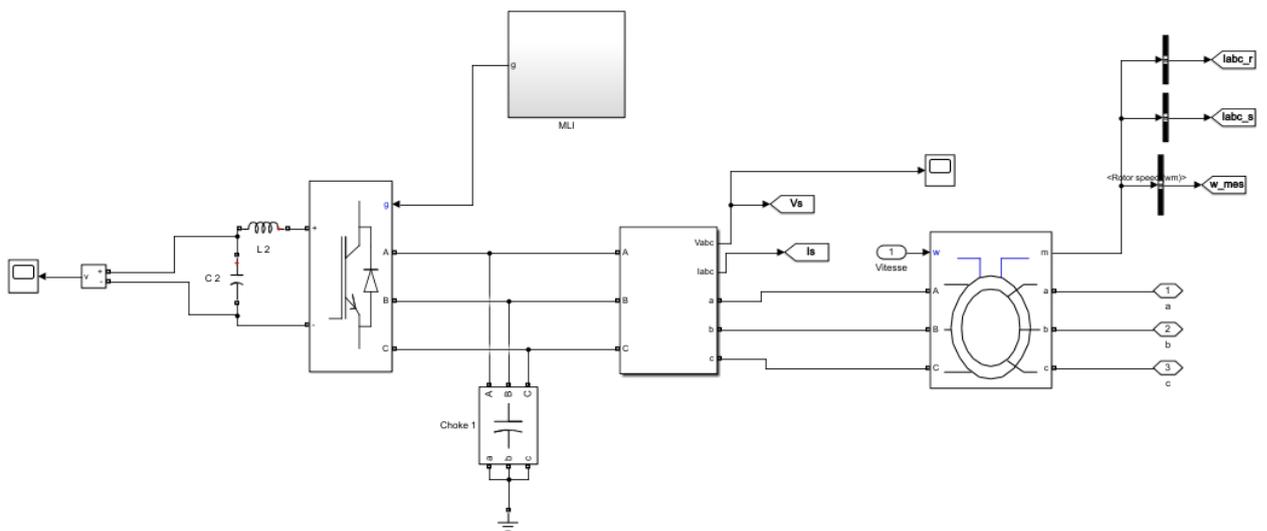


FIGURE A.3 – le diagramme de la génératrice à double alimentation

### A.1.3 Commande de l'onduleur

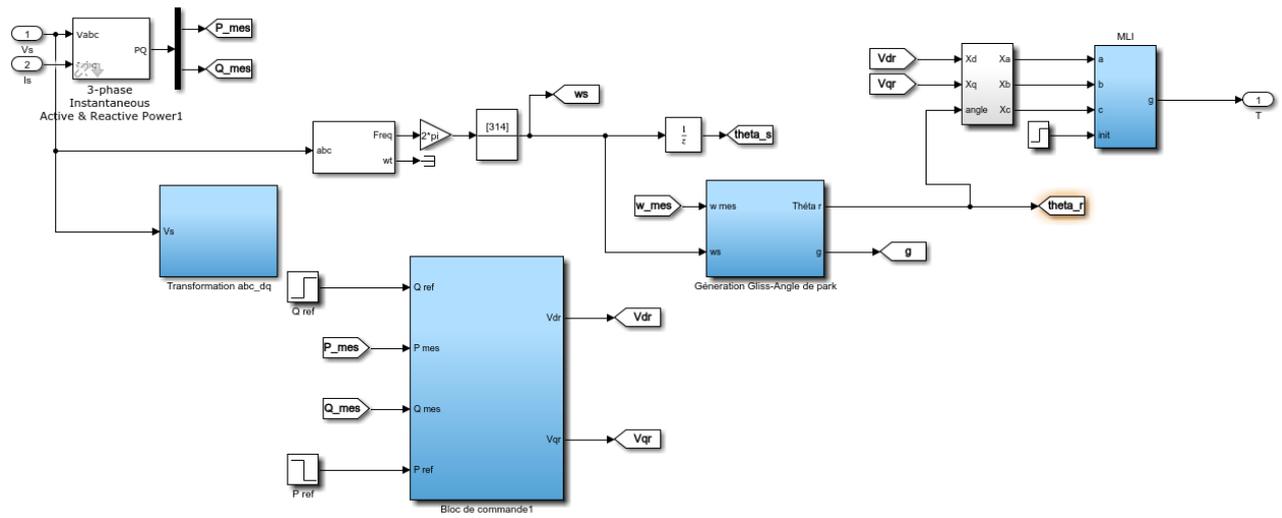


FIGURE A.4 – Diagramme de la commande de l'onduleur

#### A.1.3.1 La commande directe des puissances

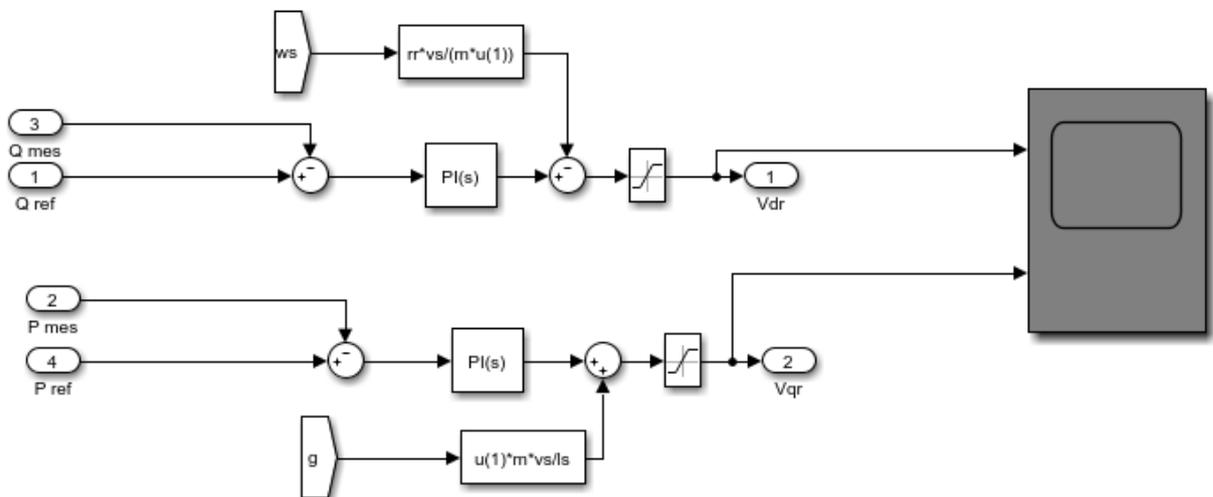


FIGURE A.5 – Diagramme de la commande direct des puissances

## A.2 La chaîne photovoltaïque

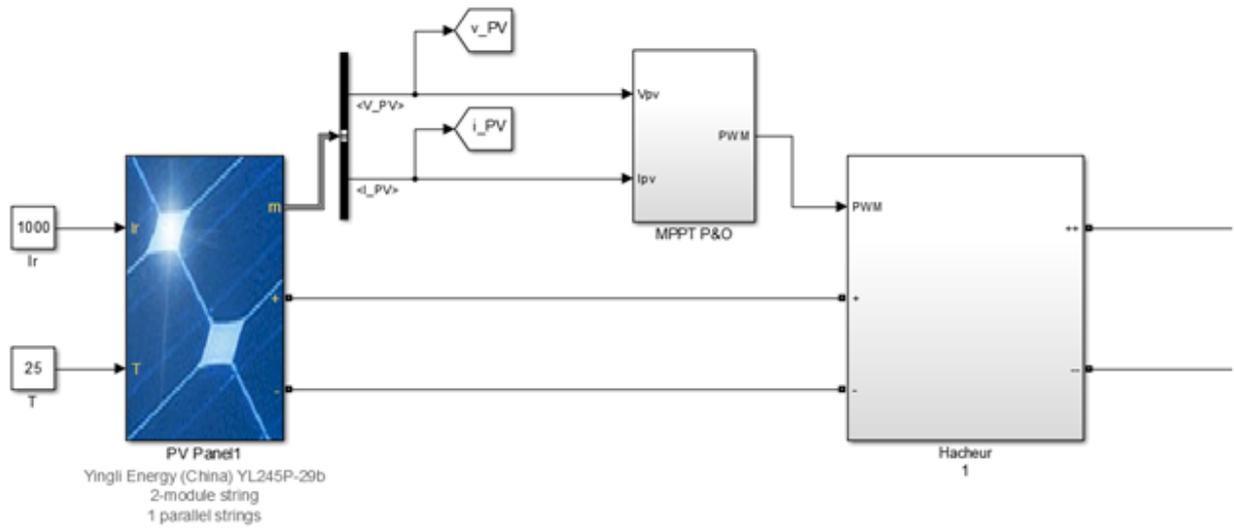


FIGURE A.6 – Diagramme de la chaîne photovoltaïque

### A.2.1 Hacheur boost

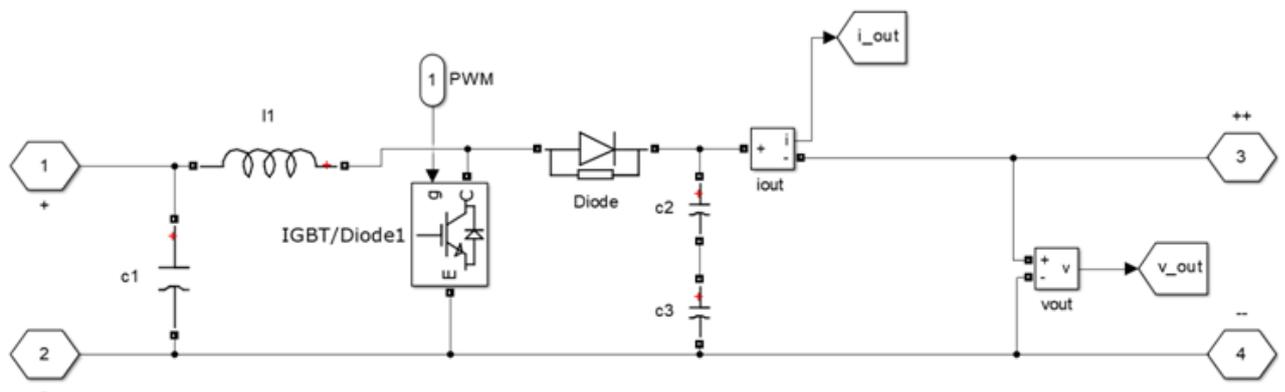


FIGURE A.7 – Diagramme du hacheur survolteur

## A.2.2 La commande MPPT

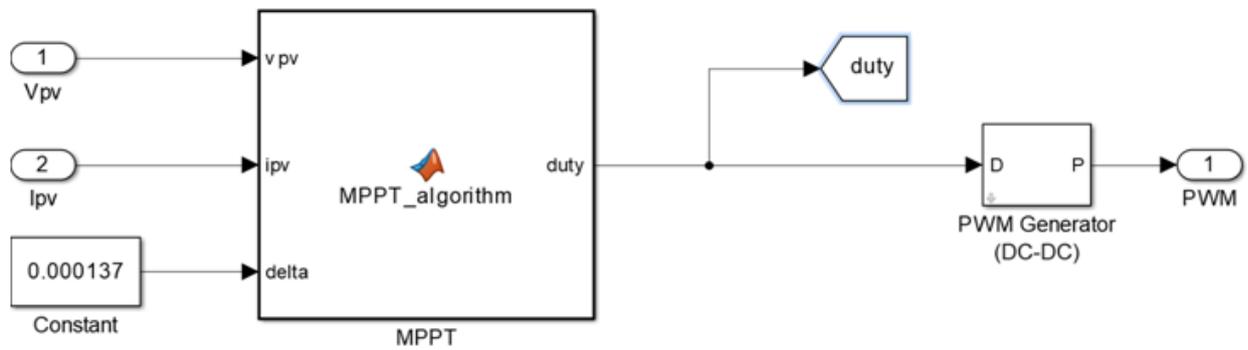


FIGURE A.8 – Diagramme de la commande MPPT *P&O*

## Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre des énergies renouvelables associées au domaine de génie électrique, son objet porte sur l'étude des performances d'un système énergétique hybride éolien-photovoltaïque. Ce mémoire a abordé les points importants suivants : un état de l'art sur les énergies éoliennes et photovoltaïques, une modélisation d'un système de conversion éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation, l'analyse des différentes stratégies de réglage des puissances active et réactive injectées par la génératrice asynchrone à double alimentation au réseau électrique en utilisant des commandes employant des régulateurs classiques basés sur les concepts de l'automatique linéaire, une modélisation mathématique du système solaire qui permet de simuler les interactions météorologiques avec une optimisation de ce système par la méthode MPPT et en final une combinaison des deux systèmes étudiés pour l'alimentation d'une charge isolé. Mots-clés : Moteur asynchrone à double alimentation, générateur photovoltaïque, modélisation, commande vectorielle, MPPT, système hybride, énergie renouvelable, régulateur PI .

**Mots clés :** Lorem, ipsum, dolor, sit amet, consectetur, adipiscing elit.

## Abstract :

This work is part of the renewable energies associated with the field of electrical engineering, its purpose is the study of the performance of a hybrid wind-photovoltaic energy system wind-photovoltaic. This dissertation approached the following important points : generalities on wind and photovoltaic energy, a modeling of a wind conversion system based on a double fed induction machine, the analysis of the various adjustment strategies of the active and reactive power injected by the double fed induction machine to the electrical grid using classical regulators based on the concepts of linear automatic, a mathematical modeling of the solar system that simulates meteorological interactions and an optimization of this system by the MPPT method and finally a combination of both systems studied to feed an isolated load.

Keywords : Double fed induction generator, photovoltaic generator, vector control, MPPT, hybrid system, renewable energy, PI regulator.

**Key-words :** Lorem, ipsum, dolor, sit amet, consectetur, adipiscing elit.

## ملخص

هذا العمل هو جزء من الطاقات المتجددة المرتبطة بمجال الهندسة الكهربائية، الغرض منه هو دراسة أداء نظام الطاقة الهجينة الريحية-الكهروضوئية. تناولت هذه الأطروحة النقاط الهامة التالية : عموميات على طاقة الرياح والطاقة الكهروضوئية، نمذجة لنظام تحويل الرياح المعتمد على مولد غير متزامن ثنائي التغذية، تحليل مختلف استراتيجيات تعديل الطاقات المتفاعلة وغير المتفاعلة التي يضخها المولد غير متزامن ثنائي التغذية في الشبكة الكهربائية باستخدام المنظمين الكلاسيكيين التي تعتمد على مفهوم التلقائية الخطية، النمذجة الرياضية للنظام الشمسي التي تسمح بمحاكاة التفاعلات الجوية مع تحسين عمل هذا النظام من خلال طريقة تتبع نقطة الطاقة العظمى وأخيرا دمج النظامين المدروسين لتغذية حمل كهربائي معزول.

**الكلمات المفتاحية:** مولد غير متزامن ثنائي التغذية، مولد كهروضوئي، النمذجة، التحكم الشعاعي، تتبع نقطة الطاقة العظمى، نظام هجين، طاقة متجددة، منظم.