

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*



*Université Abderrahmane Mira – Béjaïa*

*Faculté de Technologie*

*Département de Génie Electrique*



# Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de master en Electrotechnique

**Option :** Commande des systèmes électriques.

## THÈME

**Etude d'un système hybride autonome**

**Présenté par :**

**M<sub>r</sub> Chelabi Anis**

**M<sub>r</sub> Ibelhoulen Aziz**

**Encadré Par :**

**M<sub>r</sub> K. Idjdarene**

**M<sup>me</sup> D. Rekioua**

*Promotion 2011 / 2012*

## *REMERCIEMENTS*

*Nous remercions Dieu pour le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.*

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à M<sup>r</sup> K. IJDARENE et M<sup>me</sup> D. REKIOUA qui ont proposé et dirigé ce projet et pour leurs entière disponibilité, leurs aides et leurs précieux conseils.*

*Notre sincère gratitude va aussi aux membres du jury qui ont bien accepté de jugé ce présent travail.*

*Nous tenons à remercier M<sup>r</sup> N. MEZAI pour son précieux aide lors de la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*Enfin que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.*

# DÉDICACES

*Ce travail achève avec l'aide de Dieu, le tout puissant*

Ce travaille est dédié à toutes ces personnes que j'aime :

A mes très chers parents, qui se sont sacrifié pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leurs soutient depuis toujours. Et leurs encouragement, consentis dans le soucie de ma réussite.

A La mémoire de mes grands parents, et que dieu  
Protège mes grandes mères.

A mes très chers frères Walid, Houcine, Kousseila.

A ma très chères sœur Amel.

A tous mes cousins et cousines.

A toute mes amis et amies.

A mes copains de chambre Brahim et Nadir

A toutes personnes qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.

ANIS.

# DÉDICACES

*Ce travail achève avec l'aide de Dieu, le tout puissant*

Ce travail est dédié à toutes ces personnes que j'aime :

A mes très chers parents, qui se sont sacrifié pour m'offrir un climat idéal de travail,

qui n'ont jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leurs soutient depuis

toujours. Et leurs encouragement, consentis dans le soucie de ma réussite.

A mes très chers frères Leyas, Zin din.

A mes très chères sœurs et à la famille de ma grande sœur.

A mes très chères oncles et tantes.

A tous mes amis et amies.

A toutes personnes qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.

AZIZ.

# Sommaire

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

## **Chapitre I : Généralité sur les photovoltaïque, éolienne et hybride**

I.1.Introduction .....	03
I.2.Les énergies renouvelables .....	03
I.2.1. L'énergie solaire .....	03
I.2.2.L'énergie éolienne.....	04
I.2.3.L'énergie hydraulique.....	04
I.2.4.L'énergie géothermique.....	04
I.2.5 .La bioénergie .....	05
I.2.6. Les énergies marines .....	05
I.3. Production d'électricité dans le monde.....	05
I.4 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie.....	07
I.5. Energie photovoltaïque.....	09
I.5.2. Type de systèmes photovoltaïques.....	09
I.5.2.a. Systèmes autonomes .....	09
I.5.2.b. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau .....	10
I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	10
I.5.4. Les différents types de cellules solaires.....	10
I.5.5 Schématisation simplifié d'une cellule.....	11
I.5.6. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.5.7 Association en série et en parallèle des cellules photovoltaïques.....	12
I.5.8. Zones de fonctionnements d'un module solaire.....	13
I.5.9.Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	14
I.6.Energie éolien.....	15
I.6.1. Descriptif d'une éolienne.....	15
I.6.2 Principaux composants d'une éolienne.....	16
I.6.3 Les différents types de turbines.....	16
I.6.4.Puissance récupérable par une turbine .....	17
I.6.5 Différents types de machines électriques utilisées.....	19
I.6.7.Avantage et Inconvénient d'une énergie éolienne.....	22
I.7. les systèmes hybrides.....	23
I.7.2.Les différents chaines de conversion d'un système hybride.....	23

I.7.3. Le choix de la chaîne de conversion d'énergie.....	26
I.8. Conclusion.....	27

## **Chapitre II : Modélisation, Identification de la chaîne de conversion photovoltaïque**

II.1. Introduction.....	29
II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	29
II.3.1. Modèle de la cellule solaire.....	30
II.3.2. Modélisation du panneau photovoltaïque.....	31
II.3.2.1 Cellule idéale.....	32
II.3.2.2. Modèle explicite.....	33
II.3.2.4. Modèle simplifié à une diode.....	34
II.3.2.5. Modèle à deux diodes.....	35
II.4. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	36
II.5. Identification de panneau photovoltaïque.....	36
II.6 Influence de l'éclairement et de la température sur courant et la tension.....	41
a) Influence de l'irradiation.....	43
b) Influence de la température.....	44
II.7 Conclusion.....	45

## **Chapitre III : Etude de la chaîne éolienne**

III.1. Introduction.....	43
III.2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.....	43
III.2.1. Constitution de la chaîne éolienne.....	43
III.2.2. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	43
III.2.2.1. Les équations de la machine dans le repère abc.....	44
III.2.2.2. Les équations de la machine dans le repère dq.....	45
III.2.3. Modélisation du redresseur (PD3).....	47
III.3. Simulation de la chaîne de production éolienne.....	47
III.4 Conclusion.....	55

## **Chapitre IV : Etude et simulation de la chaîne hybride**

IV.2. Modélisation de la batterie.....	57
➤ Modèle idéal de la batterie .....	57
➤ Modèle simplifié de batterie.....	57
➤ Modèle CIEMAT.....	58
➤ Modèle de Thévenin.....	58
VI.3 Simulation du système Hybride.....	59
VI.3.1 Simulation du système photovoltaïque-batteries.....	59
VI.3.2. Simulation de la chaîne hybride.....	62
IV.4. Conclusion.....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>66</b>

# Liste des Figures

## LISTE DES FIGURES

Figure (I-1) : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2010.....	6
Figure. (I-2) : Répartition de la production d'électricité mondiale, d'origine.....	6
renouvelable, en 2010	
Figure (I-3) : Taux de croissance annuels moyens entre 2000 et 2010, des sources.....	7
de production électrique mondiale.	
Figure (I.4) : Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet).....	8
Figure (I.5) : Carte des vents en Algérie.....	8
Figure (I.6) : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	10
Figure (I.7) : Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure (I.8) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque I-V.....	12
Figure(I.9) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques...	12
Figure (I.10) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules.....	13
identiques	
Figure (I.11) : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle.....	13
Figure (I.12) : Différentes zones de la caractéristique I (V), T = 25 °C.....	14
Figure (I.13) : Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	16
Figure (I.14) : éolienne à axe horizontal.....	17
Figure (I.15) : éolienne à axe vertical.....	18
Figure (I.16) : Coefficient de puissance... ..	19
Figure (I.17):Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation..	20
normalisée	
Figure (I.18) : Machine synchrone avec redresseur à diodes.....	21
Figure (I.19) : Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.....	21
Figure (I.20) : Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.....	22
Figure (I.21) : Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs....	22
Figure (I.22) : Schémas de principe d'un système hybride éolien-diesel.....	24
Figure (I.23) : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible .....	25
Figure (I.24) : Schémas de principe d'un système hybride solaire-diesel.....	25
Figure (I.25) : Schémas de principe d'un système hybride éolien-solaire diesel.....	26

Figure(I.26):Schémas de principe système hybride éolien-diesel stockage a hydrogène.....	26
Figure (I.27) : Schémas de principe d'un système hybride éolien photovoltaïque.....	27
Figure (II.1) : Schéma simplifié de la chaine photovoltaïque.....	28
Figure (II.2) : Schéma bloc de générateur photovoltaïque.....	28
Figure(II.3) : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	31
Figure (II.4) : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	32
Figure (II.5) : Schéma d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.....	33
Figure (II.6) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque (deux diodes).....	34
Figure (II.7) : Variation de courant de charge par la variation de résistance.....	36
Figure (II.8) : Caractéristique (V-I) d'un module photovoltaïque ( $E=950\text{W/m}^2$ , $T=27^\circ$ ).....	37
Figure (II.9) : Caractéristique (P-V) d'un module photovoltaïque ( $E=950\text{W/m}^2$ , $T=27^\circ$ ) .....	38
Figure (II.10) : Caractéristique (V-I) du photovoltaïque ( $E=888\text{ W/m}^2$ , $T=30.5^\circ$ ).....	38
Figure (II.11) : Caractéristique (P-V) d'un module photovoltaïque ( $E=888\text{W/m}^2$ , $T=30.5^\circ$ )..	38
Figure ( II.12) : Caractéristique (V-I) d'un module photovoltaïque ( $E=650\text{W/m}^2$ , $T=27.6^\circ$ )..	39
Figure (II.13) : Caractéristique (P-V) d'un module photovoltaïque ( $E=650\text{W/m}^2$ , $T=27.6^\circ$ )..	39
Figure (II.14) : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour .....	40
différents niveaux d'irradiation ( $E=400, 600, 800, 1000\text{ W/m}^2$ ) et $T_c=25^\circ\text{C}$	
Figure (II.15) : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour.....	41
différents niveaux d'irradiation ( $E=400,600, 800, 1000\text{ W/m}^2$ ) et $T_c=25^\circ\text{C}$	
Figure (II.16) : Caractéristique courant-tension du module pour différents.....	41
niveaux de température ( $T_c= 0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et $E = 1000\text{W/m}^2$	
Figure (II.17) : Caractéristique puissance-tension du module pour différents.....	42
niveaux de température ( $T_c= 0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et $E=1000\text{W/m}^2$	
Figure (III.1) : Schéma simplifié du système de conversion éolien à étudier.....	43
Figure (III.2): Passage du repère (a,b,c) du stator au repère (d, q) de Park.....	45
Figure (III.3) : Redresseur PD3à diodes.....	47
Figure (III.4) : Schéma bloc du système éolien étudié .....	48
Figure (III.5) : Allure de la vitesse appliquée à MSAP.....	49
Figure (III.6) : Allure du Couple électromagnétique de la GSAP.....	50

Figure (III.7): Allure de puissance électromagnétique de la GSAP.....	50
Figure (III.8) : Allure des tensions statorique ( $V_{abc}$ ).....	51
Figure (III.9) : Zoom sur l'allure de la tension statorique ( $V_a$ ).....	51
Figure (III.10) : Allure des courant statorique ( $i_{abc}$ ).....	52
Figure (III.11) : Zoom sur l'allure des courants statorique ( $i_{abc}$ ).....	52
Figure (III.12) : Allure de tensions redressées ( $V_{dc}$ ) .....	53
Figure (III.13) : Zoom sur l'allure de la tension redressée ( $V_{dc}$ ).....	53
Figure (III.14) : Allure du courant redressé ( $I_{dc}$ ).....	54
Figure (III.15) : Zoom sur l'allure du courant redressé ( $I_{dc}$ ).....	54
Figure (III.16) : Allure de la puissance électrique.....	55
Figure (IV.1) : Schéma simplifié d'un système hybride autonome.....	56
Figure (IV.2) : Schéma idéal de la batterie.....	57
Figure (IV.3) : Schéma simplifié de la batterie.....	57
Figure (IV.4) : Schéma de la batterie avec le model CIEMAT.....	58
Figure (IV.5) : Modèle de Thévenin de batterie.....	58
Figure (IV.6) : Schéma bloc de charge et décharge des batteries.....	60
Figure (IV.7) : SOC des batteries.....	61
Figure (IV.8) : courant de charge des batteries .....	61
Figure (IV.9) : courant de décharge des batteries .....	62
Figure (IV.10) : Tension au bornes des la batterie.....	62
Figure (IV.11) : Shéma bloc de la chaine hybride.....	63
Figure (IV.12) : Tension redressée ( $V_{dc}$ ).....	64
Figure (IV.13) : Courant redressée ( $I_{dc}$ ) .....	64
Figure (IV.14) : Courant de la charge ( $I_{ch}$ ).....	64
Figure (IV.15) : Courant de décharge des batteries ( $I_{dech}$ ).....	64
Figure (IV.16) : Puissance électrique ( $P_{dc}$ ) .....	65
Figure (IV.17) : Puissance de la charge ( $P_{ch}$ ).....	65
Figure (IV.18) : SOC des Batteries .....	65
Figure (IV.19) : Tension des batteries ( $V_{bat}$ ) .....	65

# Liste des Tableaux

## LISTE DES TABLEAUX

<b>chapitre</b>	<b>N°</b>	<b>Titres</b>	<b>pages</b>
<b>I</b>	01	durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien.	07
<b>II</b>	02	Paramètres d'un panneau photovoltaïque SHARP NTR5E3E	36
<b>III</b>	03	paramètre de la GSAP	48

# Nomenclatures

# NOMENCLATURES

## **Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens, photovoltaïques et hybrides.**

$C_p$  : est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

$C_p^{\max}$  : le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine maximal.

$p_t$  : la puissance de la turbine (w).

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

$R_t$  : représente le rayon de la voilure (m).

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

$\lambda$  : Vitesse spécifique (m/s).

$\Omega_t$  : la vitesse de rotation des pales (rad /s).

$P_v$  : la puissance du vent (w).

$p_{t-\max}$  : la puissance maximale de la turbine (w).

## **Chapitre II : Modélisation, Identification et simulation de la chaine de conversion photovoltaïque.**

$I_{cc}$  : courant de court circuit de la cellule (A).

$G$  : la quantité des paires électron-trou.

$V_{oc}$  : la tension de circuit ouvert (V).

$I_s$  : courant de saturation de la diode (A).

$V_{th}$ : tension thermique (V).

$A$  : coefficient d'idéalité de la diode.

$q$  : charge d'un électron  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

$T_c$  : Température de la jonction ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$K$  : Constante de Boltzmann  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ (J/k)}$ .

FF : facteur de forme.

$V_m$  : Tension de point de puissance maximale (V).

$I_m$  : Courant de point de puissance maximale (A).

$\eta$  : Le rendement de conversion d'énergie.

$P_{\max}$  : la puissance maximale (w).

$P_{in}$  : la puissance incidente (w).

$E$  : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $\text{W/m}^2$ ).

$S$  : La surface effective des cellules ( $\text{m}^2$ ).

NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_a$  : La température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$I$  : courant disponible (A).

$I_{ph}$  : courant produit par la photopile(A).

$v$  : tension aux bornes de la cellule(V).

$KT_c / q = 26\text{mV}$  à  $300\text{ }^{\circ}\text{K}$  pour le silicium poly-cristallin ( $V_{th}$ ).

$I_s$  : courant de polarisation de la diode ou courant de saturation (A).

$I_m$  : courant maximal (A).

$V_m$  : la tension maximale (V).

$C_1, C_2$  : Coefficients.

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ).

$R_{sh}$  : Résistance shunte ( $\Omega$ ).

$T_{cref}$  : température de référence ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$I_s$  : Courant de saturation(A).

$I_{pv}$  : courant du module photovoltaïque (A).

$V_{pv}$  : tension du module photovoltaïque (V).

$P_{pv}$  : puissance du module photovoltaïque (w).

$E_{ref}$  : Ensoleillement de référence ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ : Paramètres constants du panneau photovoltaïque.

$n_s$  : Nombre de cellules en série.

$n_p$  : Nombre de cellules en parallèle.

### **Chapitre III : Etude et simulation de la chaine éolienne.**

$S$  : est la surface traversée par le vent ( $\text{m}^2$ ).

$\beta$  : L'angle de calage.

$C_{mec}$  : le couple mécanique (N.m).

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice (N.m).

$C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements (N.m).

$f$  : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

$V_{abc}$  : Les tensions de phase statorique de la machine.

$I_{abc}$  : Les courants de phase statorique de la machine.

$L$  : Inductance propre de chaque phase.

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique.

$M$  : Inductance mutuelle entre deux phases au stator.

$\varphi_{\text{fabc}}$  : flux statorique.

$E$  : Force électromotrice.

$\varphi_f$  : Amplitude du flux de l'aimant permanent.

$p$  : Le nombre de paire de pôle.

$\omega$  : La vitesse électrique de la machine (rad/s).

$O$  : Composante homopolaire

$X, x$  : Tensions, flux ou courants.

$[P(\theta)]^t$  : Matrice de Park transposée.

$\theta$  : Angle que fait l'axe « a » avec l'axe « d ».

$\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine en (rad/s).

$t_m$  : constante de temps mécanique (s).

$\Phi$  : le flux de l'aimant (wb).

#### **Chapitre IV : Etude et simulation de la chaine hybride**

$U_{\text{batt}}$  : Tension de la batterie (V).

$I_{\text{batt}}$  : Courant de la batterie (A).

$E_{\text{batt}}$  : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie noté (EDC) (V).

$R_{\text{batt}}$  : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge ( $\Omega$ ).

$n_b$  : nombre de batterie.

$C_0$  : représente la capacité des électrodes parallèles (C).

$R_0$  : représente la résistance non linéaire due au contact de l'électrode et de l'électrolyte( $\Omega$ ).

SOC : l'état de charge des batteries.

$V_{\text{dc}}$  : Tension redressée.

$I_{\text{dc}}$  : Courant redressée.

$I_{\text{ch}}$  : Courant de la charge.

$I_{\text{dech}}$  : Courant de décharge de batterie

$P_{\text{dc}}$  : Puissance électrique.

$P_{\text{ch}}$  : Puissance de la charge.

$V_{\text{bat}}$  : Tension des batteries.

# Introduction Générale

## INTRODUCTION GENERALE

La consommation d'énergie sous toutes ses formes, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète.

Portant connaissance que la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux [1].

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente [2].

Pour minimiser cette consommation importante de la matière première qui est non renouvelable et pour la protection durable de l'environnement, nous avons recourt aux différentes sources d'énergies renouvelables (soleil, vent, courant d'eau, biomasse ou chaleur naturelle) permettent après transformation d'obtenir, de l'énergie électrique. Elles permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile ou fissile, et par conséquent de réduire les impacts environnemental et socio-économique de nos besoins en énergie électrique.

Un système hybride (photovoltaïque – éolien) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement. Il est donc évident qu'une complémentarité entre l'énergie éolienne et solaire est souhaitable et que le couplage

de ces deux sources d'énergies avec des batteries de stockage est la solution la plus sûre et la moins coûteuse pour des systèmes autonomes [3].

Ce mémoire est scindé en 4 chapitres :

Le premier chapitre expose les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, nous focalisons notre attention sur la production d'électricité photovoltaïque et éolienne, avec une description générale de différentes machines utilisées, ainsi que quelque combinaison des systèmes hybrides.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation des différents paramètres de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque et l'identification d'un panneau photovoltaïque dans des conditions de fonctionnement réelle.

Ensuite, dans le troisième chapitre de ce travail nous présentons la modélisation et la simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, basée sur la génératrice synchrone à aimants permanents et d'un convertisseur statique (redresseur PD3).

Le quatrième chapitre porte sur la simulation du système hybride (photovoltaïque-éolien avec batteries de stockage).

# Chapitre I

*Généralités sur les systèmes solaires, éoliens et hybrides.*

## I.1.Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

## I.2 Les énergies renouvelables [4]

Les énergies renouvelables sont appelées aussi l'énergie vertes correspondent à des sources d'énergie qui sont non seulement issues de phénomènes naturels, mais qui se régénèrent également par elles-mêmes, à l'aide de processus naturels indépendants des humains. Le soleil et la chaleur interne de la terre font partie des sources d'énergie naturelles les plus importantes. Le fait qu'une ressource soit renouvelable ou non, dépend aussi de la vitesse à laquelle celle-ci est consommée. Prenons par, exemple, le bois : tant que le nombre d'arbres coupés n'excède pas le nombre d'arbres qui poussent, le bois peut être considéré comme étant une ressource renouvelable.

### I.2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire correspond au type d'énergie que le soleil diffuse dans l'atmosphère par son rayonnement. Elle est obtenue grâce à des panneaux solaires et est utilisée sous plusieurs formes :

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

- c- **l'énergie solaire passive:** est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

### **I.2.2 L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est produite par l'air en mouvement (vent) qui est produit par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression crée les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Les éoliennes qui sont utilisées pour générer ce type d'énergie. Celles-ci sont installées dans des endroits où le vent souffle avec intensité et peuvent produire jusqu'à 4,5 MW. Le mode de fonctionnement d'une éolienne est assez simple : le vent fait tourner les pales, entre 10 et 20 tours par minute, puis l'alternateur contenu dans l'éolienne transforme l'énergie mécanique captée en énergie électrique via une génératrice.

### **I.2.3 L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique Constituant près de 6% de la quantité d'énergie produite mondialement l'énergie hydraulique est fournie par le mouvement de l'eau (généralement les chutes, les marées ou les cours d'eau à grand débit) . On peut obtenir cette forme d'énergie notamment par la construction de barrages hydroélectriques ou d'installations marémotrices, activées par les variations de la marée. Leur fonctionnement est le suivant : le débit de l'eau fait tourner la turbine fixée à l'arbre de l'alternateur qui génère un courant électrique.

### **I.2.4 L'énergie géothermique**

L'énergie géothermique est produite grâce à la chaleur présente dans les profondeurs de la Terre, dont le noyau peut atteindre 6000° Celsius. Pour fonctionner convenablement, les systèmes géothermiques ont généralement besoin de cette chaleur ainsi que d'eau : celle-ci est acheminée dans des tuyaux souterrains, où elle est réchauffée par la température ambiante pour ensuite être diffusée. De tels systèmes peuvent être instaurés partout où les sols permettent l'installation de conduits souterrains.

### I.2.5 La bioénergie

La bioénergie est une énergie dérivée de la combustion de matières organiques, aussi appelées biomasse (bois, résidus agricoles, déchets organiques divers...).

La biomasse est répartie en quatre catégories :

- biomasse sèche (bois, déchets agricoles...).
- le biogaz.
- les déchets municipaux renouvelables solides.
- la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...).

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

### I.2.6 Les énergies marines

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources d'énergies renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir devant elle [4].

## I.3 Production d'électricité dans le monde [5]

En 2010, la production d'électricité mondiale (Figures (I-1) et (I-2)) provenant des sources d'énergies renouvelables atteint 19,8 % de la production totale. Cette part est nettement inférieure à la production issue des combustibles fossiles (67,2 %) mais reste néanmoins supérieure à la part de la production d'origine nucléaire (13,0 %). Les 0,2 % manquants sont fournis par la combustion des déchets dits non renouvelables. De ces six sources composant la production d'électricité renouvelable, la principale est l'hydroélectricité avec 82,9 % de la production totale d'origine renouvelable. La biomasse, qui comprend la biomasse solide et liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables est la seconde source avec 6,3 %.

Viennent ensuite la filière éolienne (8,3 %), la géothermie (1,6 %), le solaire qui regroupe les centrales photovoltaïques et thermiques (0,8 %), et enfin les énergies marines (0,01 %).

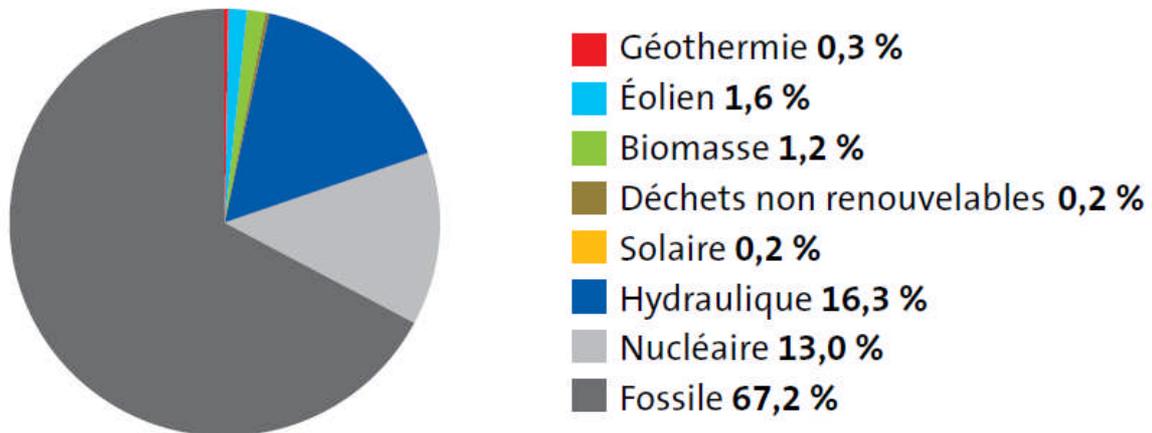


Figure (I-1) : Répartition de la production d'électricité mondiale en 2010

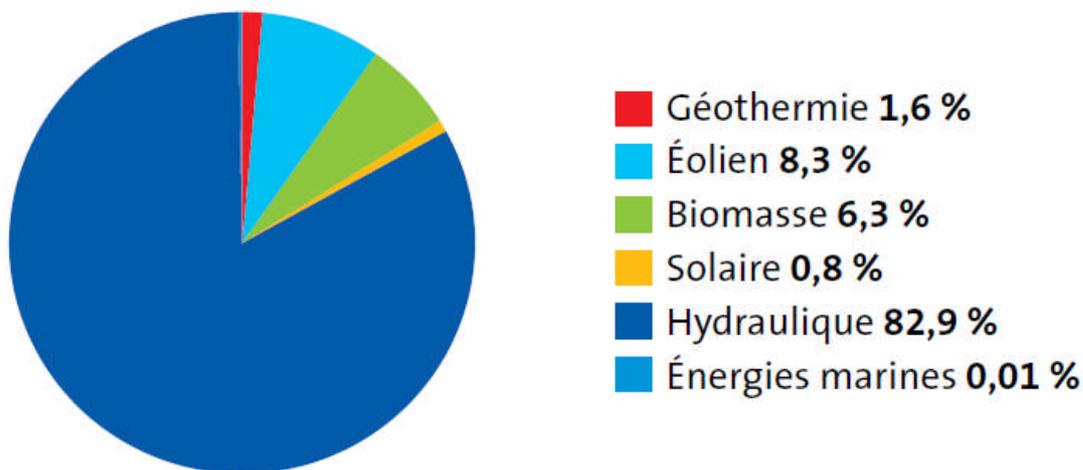


Figure. (I-2) : Répartition de la production d'électricité mondiale, d'origine renouvelable, en 2010

Entre 2000 et 2010 (Fig. I-3), ce sont les sources de production solaire et éolienne qui ont connu les taux de croissance annuels moyens les plus importants. Ils ont en effet augmenté respectivement de 38,1 et de 27,1 % par an. Seules les énergies marines ont connu une baisse de ce taux durant cette période. Pour les autres sources, ces valeurs sont comprises entre 0,6% (pour le nucléaire) et 7,0 % (pour la biomasse).

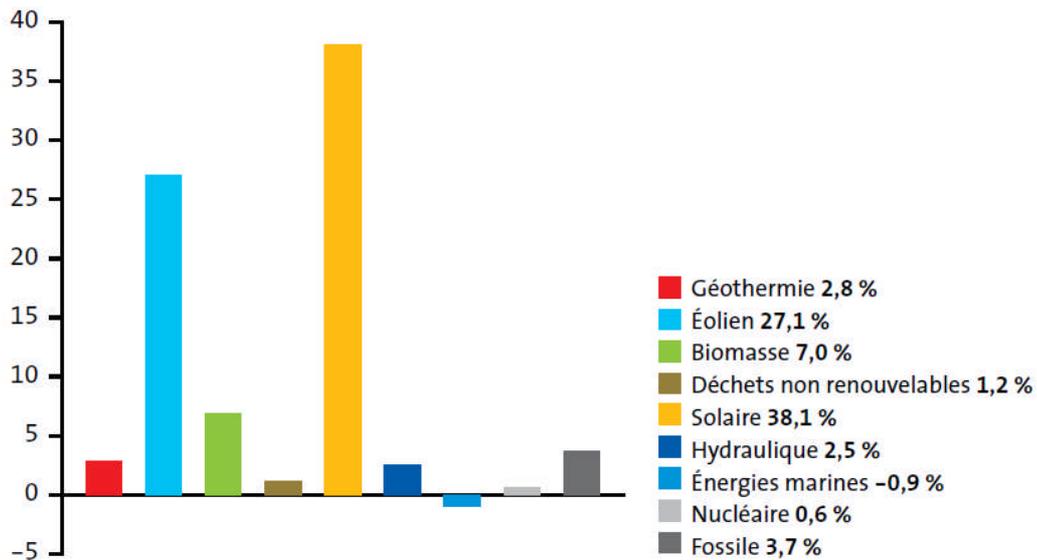


Figure (I-3) : Taux de croissance annuels moyens entre 2000 et 2010 des sources de production électrique mondiale

#### I.4 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie [6]

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

##### ➤ Potentiel solaire en Algérie [7]

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh.

Tableaux (I.1) : Durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m2/an)	1700	1900	2650

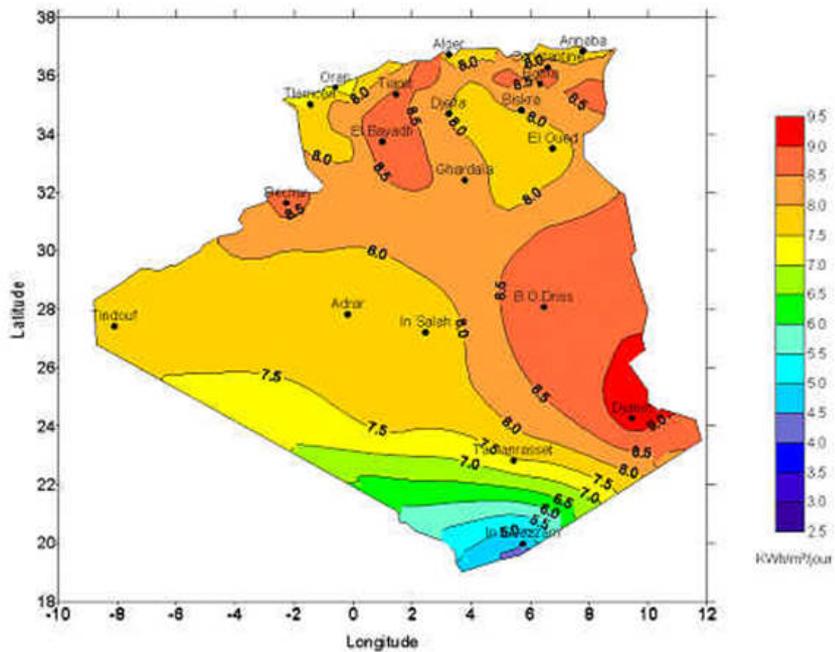


Figure (I.4) : Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)

➤ **Potentiel éolien**

L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, voir figure (I.5)). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.

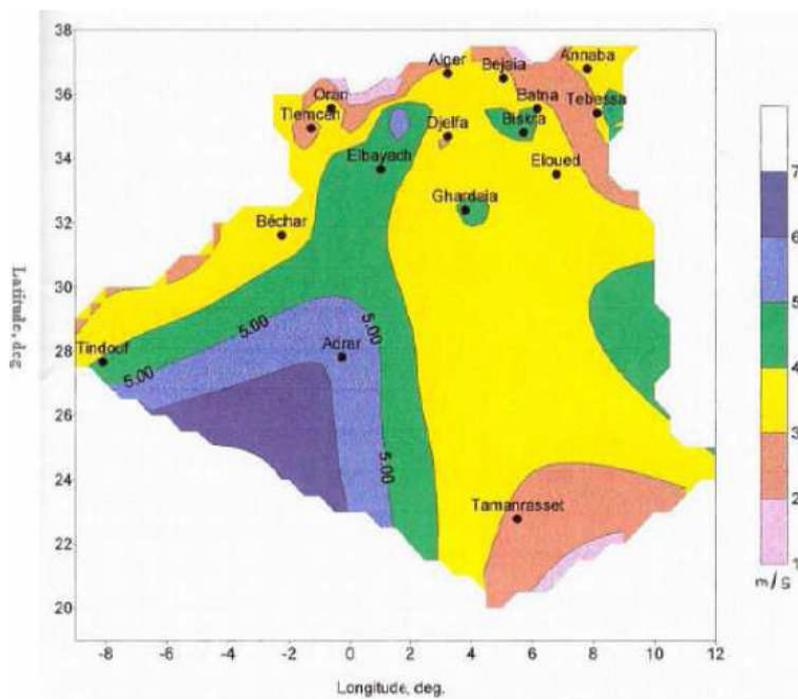


Figure (I.5) : Carte des vents en Algérie

Selon les différents taux de croissance annuelle mondiale des sources électriques représentés dans les figures précédentes et la disponibilité des gisements solaires et éoliens en Algérie, on peut dire que ces deux sources d'énergie sont complémentaires et nous assure la disponibilité de l'énergie électrique.

## **I.5 Energie photovoltaïque**

### **I.5.1 Introduction [4]**

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Phos » signifie lumière
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745- 1827, inventeur de la pile électrique).

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Plusieurs de ces cellules sont reliées entre-elles sur un panneau photovoltaïque.

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme un générateur photovoltaïque. Celui-ci convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations.

### **I.5.2 Type de systèmes photovoltaïques [1]**

#### **I.5.2.a Systèmes autonomes**

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

#### **I.5.2.b Systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas

nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.

### I.5.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [8]

La cellule solaire ou photopile est un semi-conducteur sensible à la lumière, pour l'obtenir il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type p-n, dans un matériau de silicium. Lorsque les photons ayant suffisamment d'énergie sont absorbés par ce semi-conducteur.

Ils produisent la rupture d'une liaison de valence (liaison entre les électrons et l'atome) pour chacun des atomes de silicium et un électron se libère. C'est ce que l'on appelle l'effet voltaïque. Grâce au champ électrique ( $Si^+$ ) du côté positif et on aura une différence de potentiel entre ces deux couches de l'ordre de 0.5V. En reliant ces couches on a un courant continu de l'ordre de 30mA pour chaque  $1cm^2$  de capteur sous un ensoleillement maximum de  $1kw/m^2$ . Voir figure ci-dessous.

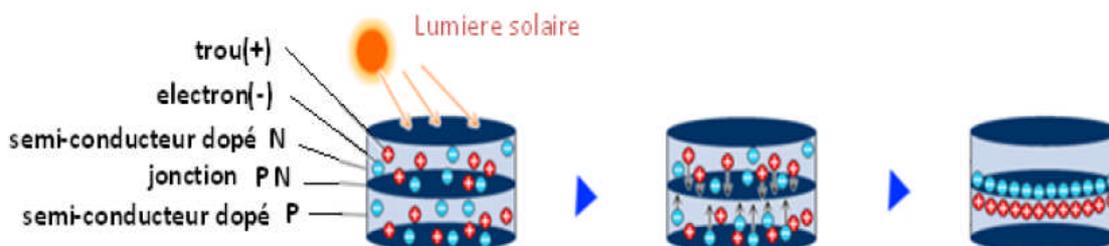


Figure (I.6) : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

### I.5.4 Les différents types de cellules photovoltaïques [9]

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

#### a- Les cellules monocristallines

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

## b- Les cellules poly cristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%).

## c- Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires.

## I.5.5 Schématisation simplifié d'une cellule [8]

La cellule photovoltaïque est représenté comme un générateur de courant qui a une résistance montée en série et une résistance de shuntée qui est montée en parallèle par rapport a une diode et ce générateur Voir la figure ci-dessous:

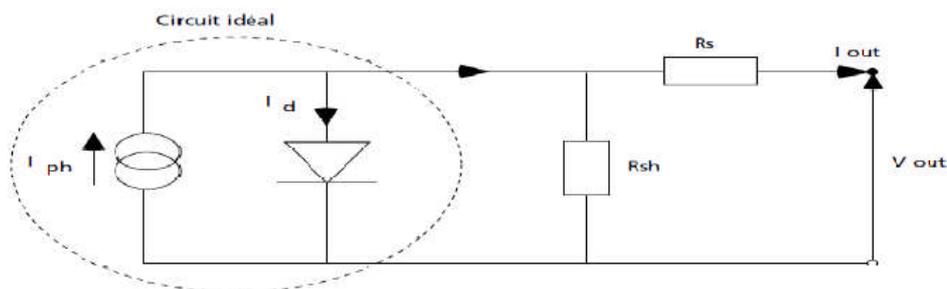


Figure (I.7) : Schéma d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.7) représente la photopile idéalisée. Une photopile comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance en dérivation ou shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

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

**I.5.6 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque**

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque dépend des conditions d'ensoleillement et de la température. Les courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque représentent la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ces borne, depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

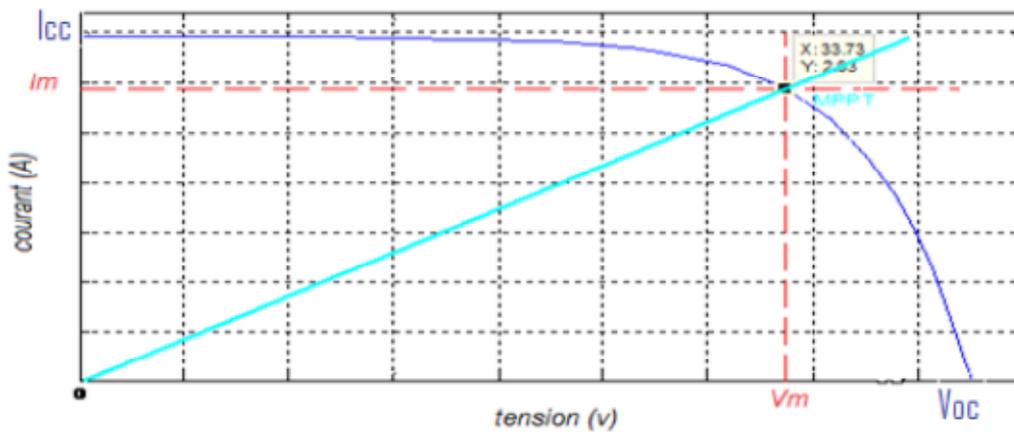


Figure (I.8) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque I-V

**I.5.7 Association en série et en parallèle des cellules photovoltaïques [6]**

**1- Mise en série**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

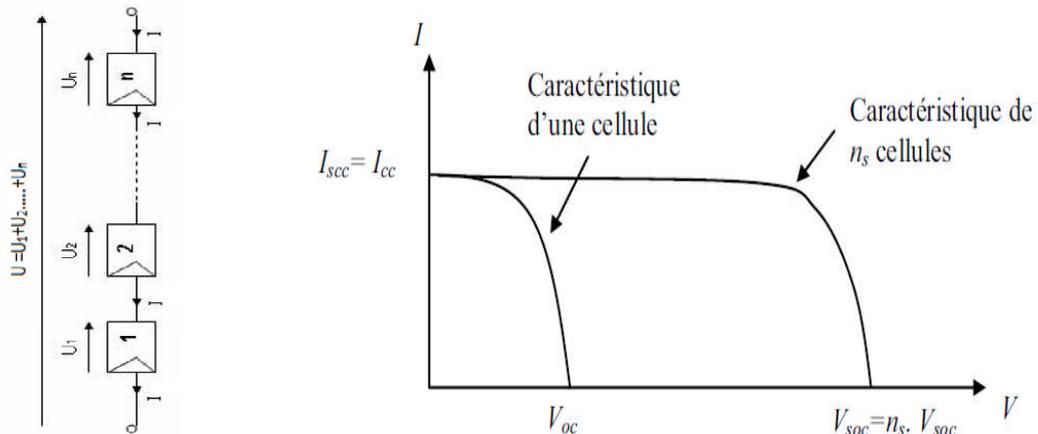


Figure (I.9) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques

## 2- Mise en parallèle [9]

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

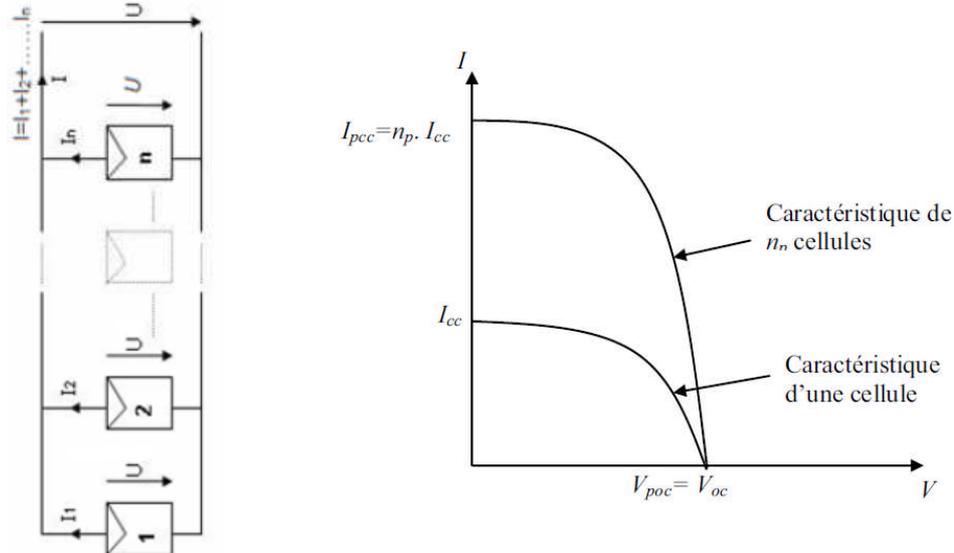


Figure (I.10) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $n_p$  cellules identiques

## 3- Association mixte (en série et en parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former un générateur photovoltaïque.

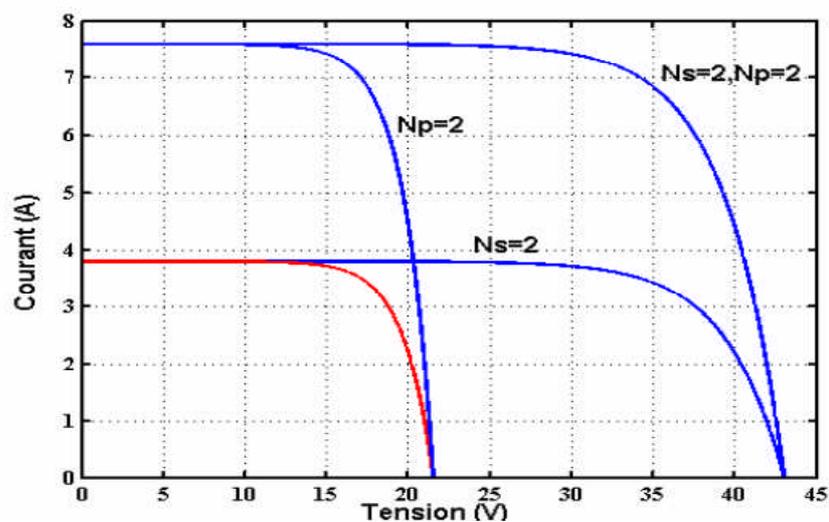


Figure (I.11) : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle

### I.5.8 Zones de fonctionnements d'un module photovoltaïques

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque, pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I-V est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.12) représente trois zones essentielles:

- fonctionnement comme générateur de courant, le point appartient à la zone (I).
- fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (III). La tension est proche de la tension à vide  $V_{oc}$  et le courant est faible.
- Fonctionnement optimal: quand le point de fonctionnement appartient à la zone (II), l'utilisation est meilleure, la puissance absorbée est maximisée.

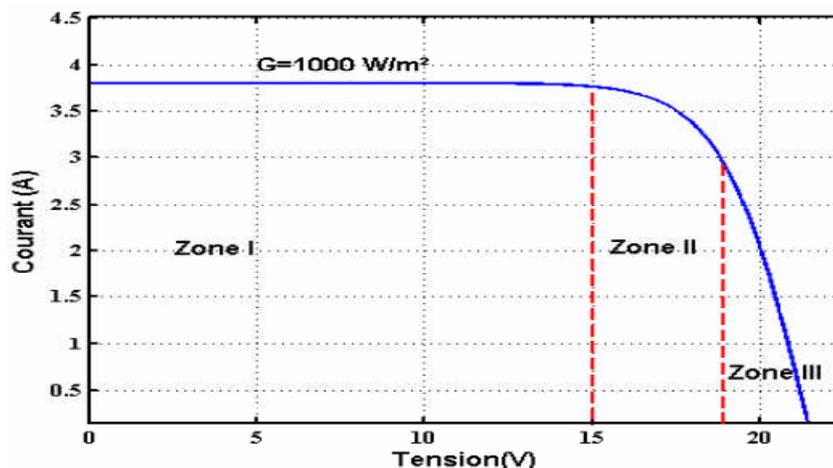


Figure (I.12) : Différentes zones de la caractéristique I (V), T = 25 °C

### I.5.9 Avantages et inconvénients d'une installation PV [3]

#### I. 5.9 .a Avantages

- ✓ Energie indépendante et performante.
- ✓ Le combustible (le rayonnement solaire) est gratuit.
- ✓ Entretien minimal.
- ✓ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- ✓ Aucun bruit.
- ✓ Non polluant.
- ✓ L'extension des systèmes est facile.

**I. 5.9.b Inconvénients [1]**

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Le faible rendement des panneaux photovoltaïques.
- ✓ Tributaire des conditions météorologiques.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

**I.6 Energie éolien****I.6.1 Introduction**

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de convertir un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent.

**I.6.2 Descriptif d'une éolienne [10]**

La figure (I.13) représente tous les éléments constituant une éolienne :

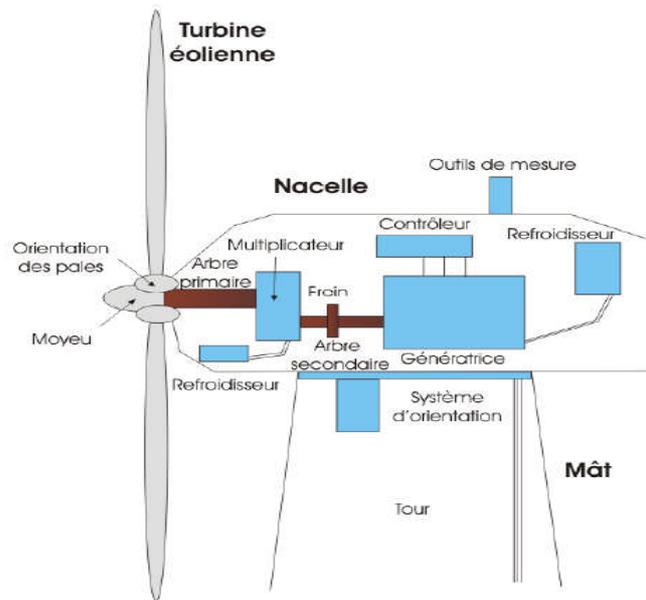


Figure (I.13) : Constitution d'une éolienne à axe horizontal

### I.6.3 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

#### 1- Le mât

généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol, Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur .

#### 2- La nacelle

Elle Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice, il est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de commande de l'éolienne.

### 3- Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire.

#### I.6.4 Les différents types de turbines [11]

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

##### a- les turbines éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation des pales.



Figure (I.14) : éolienne à axe horizontal

##### b- les turbines éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

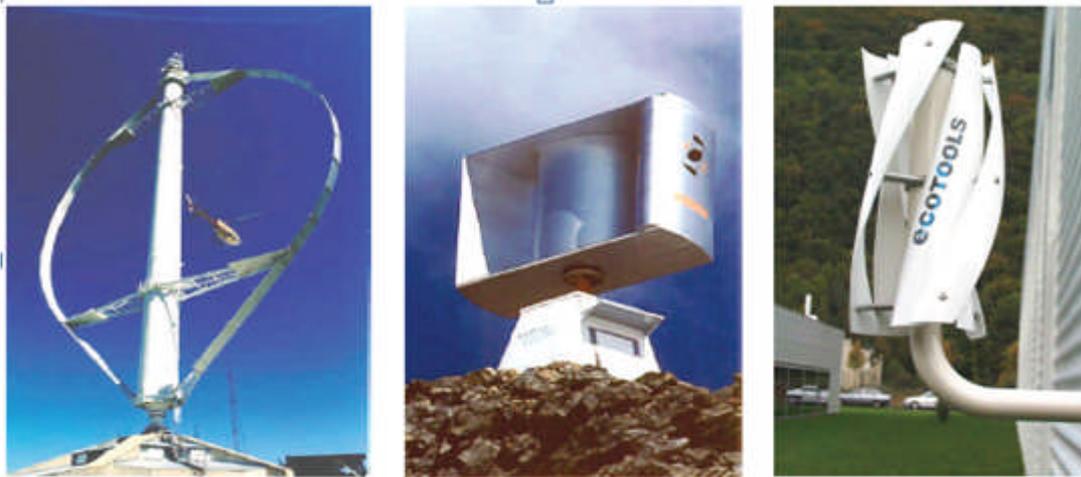


Figure (I.15) éolienne à axe vertical

### I.6.5 Puissance récupérable par une turbine [12]

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot V_w^3 \quad (\text{I.1})$$

- $C_p$  : est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
- $\rho$  : est la masse volumique de l'air.
- $R_t$  : le rayon de la turbine.
- $V_w$  : la vitesse du vent.
- $P_t$  : la puissance de la turbine.

La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Il peut avantageusement s'exprimer en fonction de  $\lambda$ , la vitesse spécifique ou normalisée.

$\lambda$  est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R_t \cdot \Omega_t}{V_w} \quad (\text{I.2})$$

$\Omega_t$  : la vitesse angulaire de rotation de la turbine.

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz:

$$P_{t-max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad (I.3)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est définie par  $(w_t R)$  qui désigne la vitesse tangentielle du bout de la pâle,  $R_t$  étant le rayon de l'aire balayée par le rotor :

$$C_p^{max} = \frac{P_{t-max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{t-max}}{\rho \cdot S \cdot V_w^3} = 0,59 \quad (I.4)$$

- $P_{t-max}$  : puissance maximal de la turbine.
- $P_v$  : puissance du vent.

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne (turbine) à la vitesse du vent :

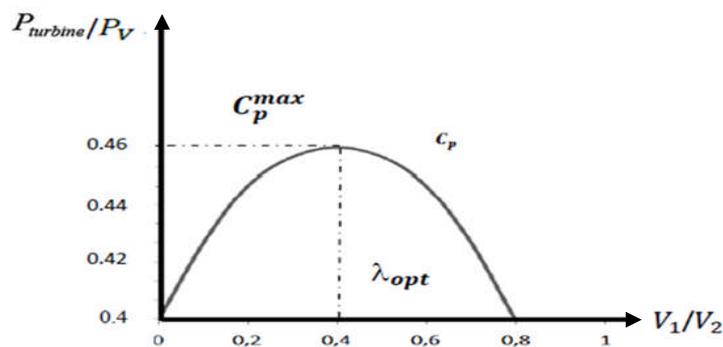
$$C_p = \frac{2 P_t}{\rho \cdot S \cdot V_w^3}$$


Figure (I.16) : Coefficient de puissance.

La figure (I.17) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pâles. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée,  $\lambda_{opt}$ , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  ne sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale [12].

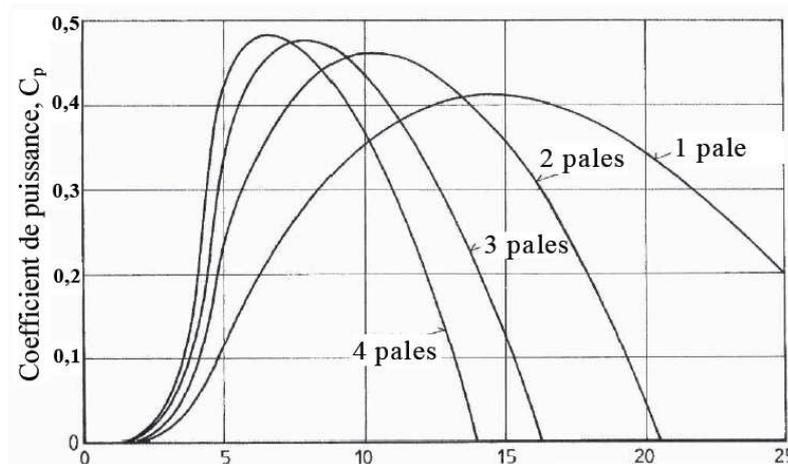


Figure (I.17) : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée

### I.6.6 Différents types de machines électriques utilisées

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe constituée d'une machine asynchrone à cage d'écureuil ou à vitesse variable constituée d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Dans ce qui suit, on présente les différentes configurations utilisées en fonctionnement autonome :

#### 1- Machine synchrone à rotor bobiné [13]

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante.

#### 2- Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est appliquée aux éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation. On donne une succincte présentation ci-dessous :

➤ **Structure avec redresseur à diodes**

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I.18).

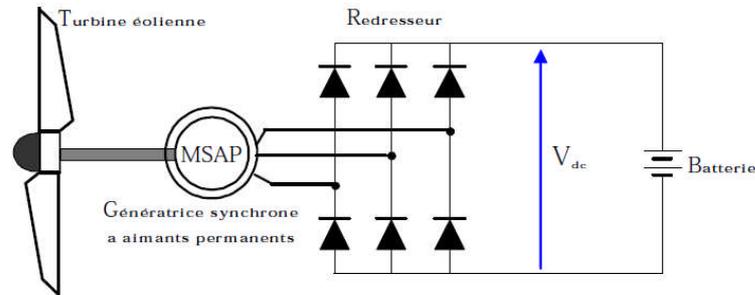


Figure (I.18) : Machine synchronisée avec redresseur à diodes

➤ **Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont**

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs  $T_1$  et  $T_2$ . Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées.

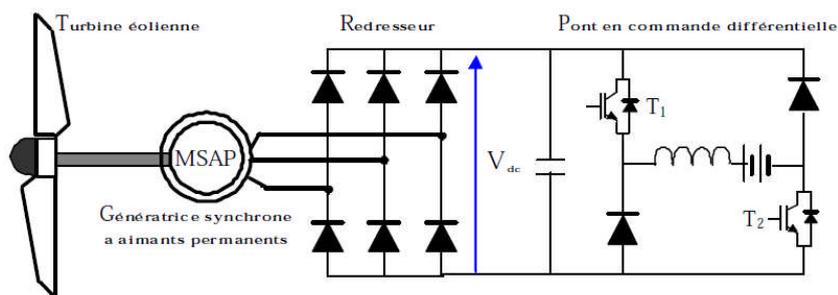


Figure I.19 – Machine synchronisée avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

➤ **Structure avec redresseur à MLI**

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (I.20), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchronisée ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation.

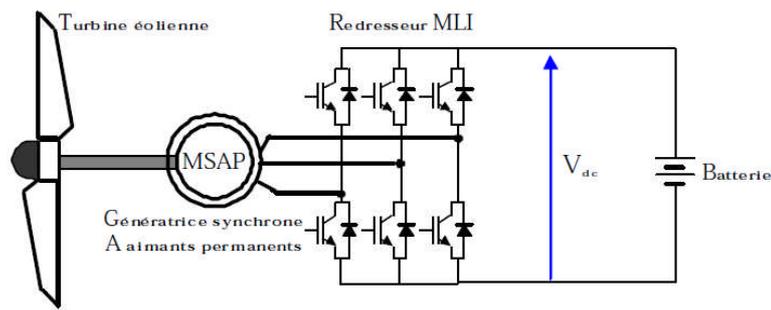


Figure (I.20) : Machine synchronisée à aimants permanents connectée à un redresseur à MLI

### 3- Les machines à réductances variables [14]

Sont des machines mécaniquement robustes ; ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple.

### 4- Les générateurs asynchrones [15]

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

#### ➤ Machines asynchrone à cage d'écureuil

Jusqu'à présent le générateur à cage correspond au choix prépondérant de par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur (Figure I.21), ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.

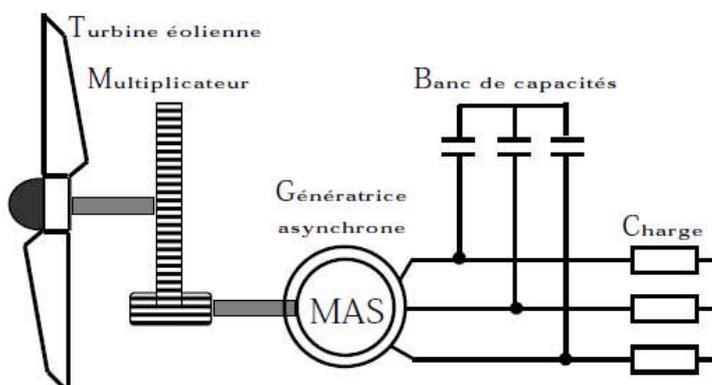


Figure (I.21) : Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs

➤ **Générateur asynchrone à rotor bobiné**

Grâce à un système de bagues et balais, la tension appliquée au rotor peut être commandée par un convertisseur électronique de puissance. De l'énergie pouvant ainsi être appliquée ou extraite du rotor, le générateur peut se magnétiser par le rotor comme par le stator.

### **I.6.7 Avantage et inconvénient de l'énergie éolienne**

#### **a- Avantage**

- L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant, ne génère aucun gaz à effet de serre et ne produit pratiquement aucun déchet.
- Les frais de fonctionnement sont limités, les coûts de production sont prévisibles et se stabilisent à long terme.
- La ressource principale – le vent – est à 100% renouvelable et son exploitation ne comporte pratiquement aucun effet néfaste pour l'environnement.

#### **b- Inconvénient**

- Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières.
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région.
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.

## **I.7. les systèmes hybrides**

### **I.7.1.Introduction**

Les systèmes hybrides se sont des systèmes qui combinent entre deux ou plusieurs sources d'énergies différentes, et cela afin d'assurer la continuité du service électrique et présente un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques.

Les systèmes hybrides se compose généralement de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.) des convertisseurs statiques et dynamique, des systèmes de stockage ( batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène..), et un systèmes de surveillance [16].

### I.7.2. Les différents chaînes de conversion d'un système hybride

Nous présentons ici quelque exemple, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architecture de chaîne de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices. Dans les limites de nos travaux, nous nous sommes intéressés à des systèmes hybrides de petite puissance dédiés à un site isolé et autonome.

#### a- Le système hybride éolien-générateur à combustible (diésel) [16]

C'est un système qui combine entre la turbine éolienne et un générateur à combustible (le diesel ou autre chose). Le système éolien qui produit une puissance électrique instable (énergie cinétique du vent instable) est accompli par le générateur à diesel et cela pour assuré la stabilité de cette dernière.

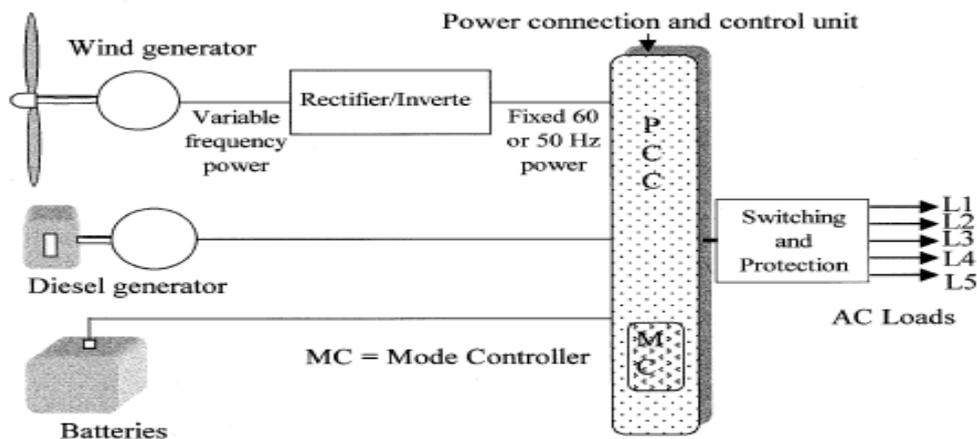


Figure (I.22) : Schémas de principe d'un système hybride éolien-diesel

#### b- Le système hybride éolien-pile à combustible [16]

C'est un système qui combine entre la turbine éolienne et la pile à combustible qui remplace le générateur à diesel avec l'avantage d'être propre (non polluante), son principe de fonctionnement est illustré par la figure (I.23).

La pile à combustible PEM met en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. la Figure (I- 23) représente une cellule de pile PEM constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par l'électrolyte, isolant électronique et conducteur ionique, une membrane polymère en nafion ou Gore d'une épaisseur typique d'une centaine de micromètres. Les

réactions électrochimiques se produisent à l'interface électrolyte électrode ou se situent une couche de diffusion des gaz et une couche d'activation contenant le catalyseur (souvent du platine nécessaire à l'activation de la réaction).

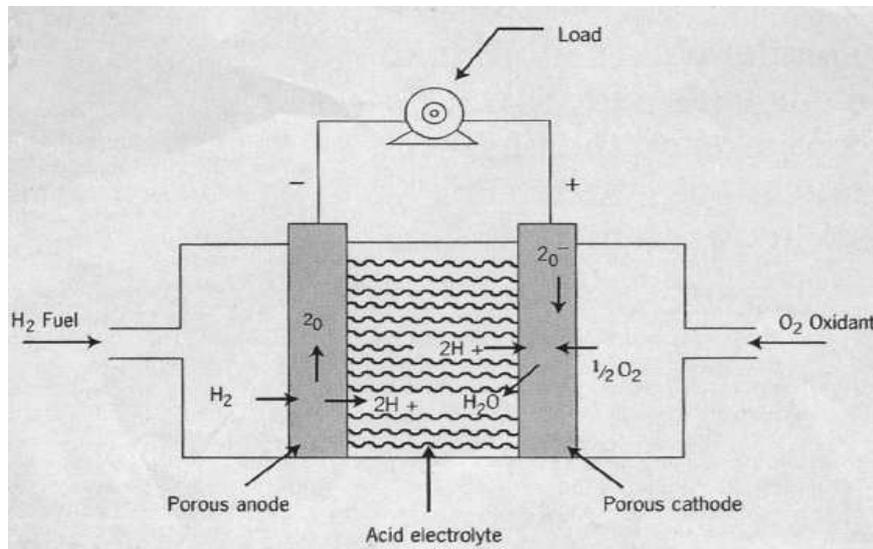


Figure (I.23) : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

### c- Le système hybride solaire-générateur à combustible [16]

C'est un système qui combine entre le système solaire photovoltaïque avec le générateur électrique à combustible (diesel) et cela comme le montre le schéma ci-dessous, figure (I.24) :

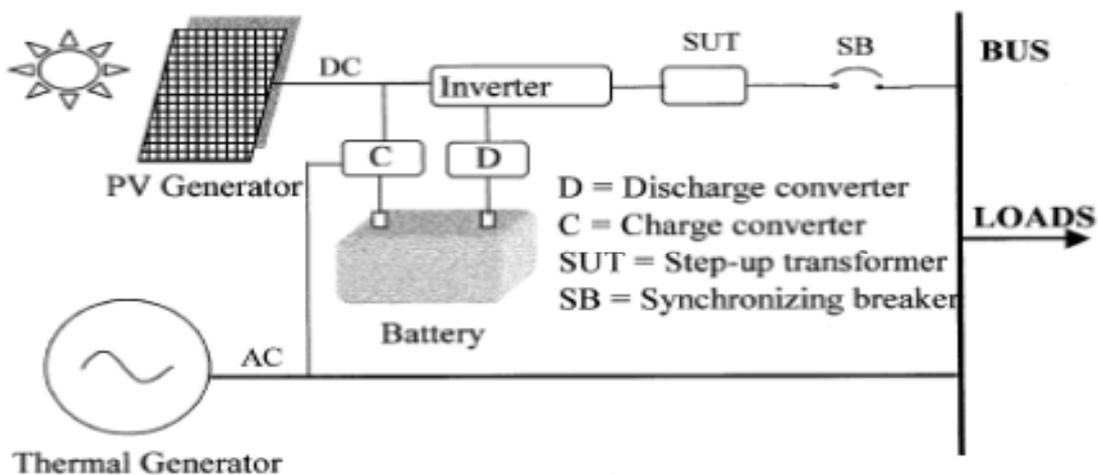


Figure (I.24) : Schémas de principe d'un système hybride solaire-diesel

#### d- Le système hybride solaire-générateur à combustible et éolienne [17]

Le fonctionnement parallèle des deux sources (éolienne, photovoltaïque) avec un groupe électrogène de secours, conçu pour l'alimentation d'un site isolé.

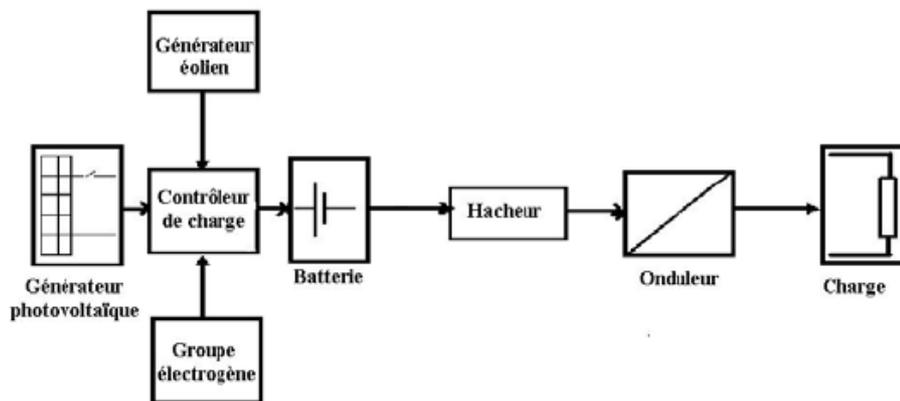


Figure (I.25) : Schémas de principe d'un système hybride éolien-solaire diesel

#### e- Le système hybride éolien diesel, stockage à hydrogène [18]

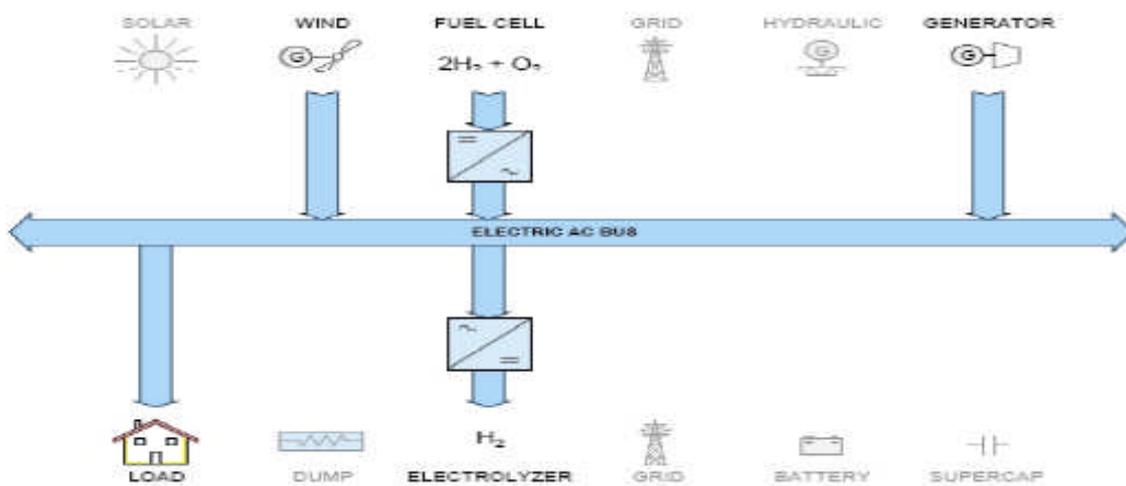


Figure (I.26) : Schémas de principe d'un système hybride éolien-diesel stockage à hydrogène

### I.7.3. Le choix de la chaîne de conversion d'énergie

En fonction de l'application et des sources d'énergies disponibles en Algérie, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. On rappelle que nous avons donné un aperçu des possibilités des énergies

renouvelables, en nous focalisant davantage sur les filières éolienne et photovoltaïque et cela vu le potentiel important et les complémentarités entre les deux sources choisies, et cela dû à la grande surface et la diversité des paysages dont notre pays dispose.

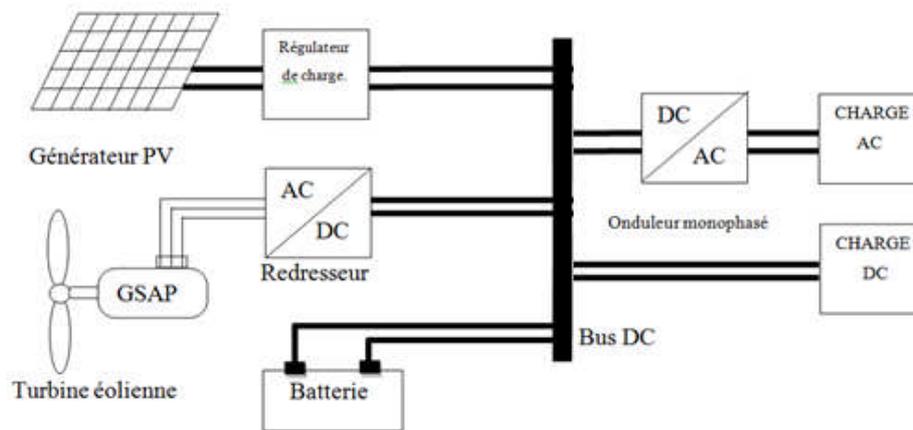


Figure (I.27) : Schémas de principe d'un système hybride éolien photovoltaïque

## I.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes éoliens et les systèmes photovoltaïques.

La première partie de ce chapitre a été consacrée aux systèmes solaires et plus précisément ceux d'origines photovoltaïques. La deuxième partie et après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement ont été décrits. Enfin, la troisième partie a été réservée à une brève description du système hybride (photovoltaïque-éolien) avec quelques chaînes de conversion.

# Chapitre II

*Modélisation, Identification et  
simulation de la chaîne de conversion  
photovoltaïque.*

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation du système photovoltaïque à étudié, puis l'identification d'un panneau photovoltaïque du système globale sous conditions de fonctionnement réelles.

## II .2. Constitution de la chaîne photovoltaïque

Le système photovoltaïque qu'on étudie est constitué de panneaux SHARP (NTR5E3E) et d'un régulateur de charge (SETECA Tarom 245), ce système alimente une charge (Batteries). La figure (II.1) montre le schéma général du système à étudier, ainsi les différentes entrées qui sont l'éclairement global ( $E_s$ ), la température de jonction ( $T_c$ ).

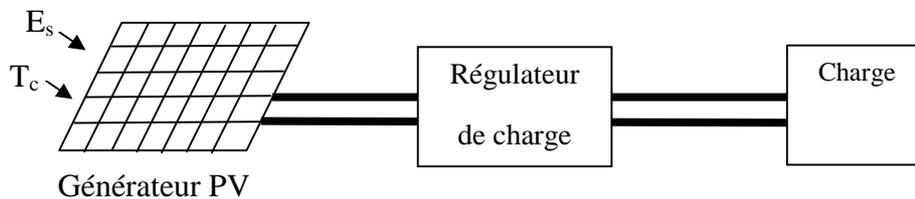


Figure (II.1) : Schéma simplifié de la chaîne photovoltaïque

## II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

La modélisation et l'optimisation des cellules photovoltaïques représentent aujourd'hui un axe essentiel de recherche dans ce domaine. Le but principal de cette analyse est de développer des modèles mathématiques, des parties actives du GPV pour prévoir les performances.

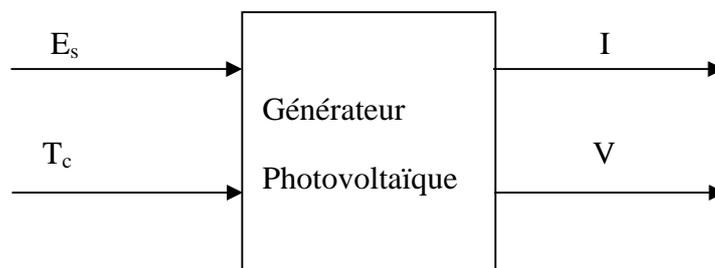


Figure (II.2) : Schéma bloc de générateur photovoltaïque

**II.3.1. Modèle de la cellule solaire [19]****✓ Le courant de court-circuit  $I_{cc}$** 

Il définit la quantité des paires électron-trou créé (G) et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) respectivement.

$$I_{cc}=q G (L_n + L_p) \quad (\text{II.1})$$

$I_{cc}$  : courant de court circuit de la cellule.

G : la quantité des paires électron-trou.

**✓ La tension en circuit ouvert  $V_{oc}$** 

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ( $I = 0$ ) fournit un courant égal au courant de court circuit  $I_{cc}$ . Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{oc} = V_{th} L_n \left( \frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad (\text{II. 2})$$

$$V_{th} = \frac{AKT_c}{q} \quad (\text{II. 3})$$

$I_s$  : courant de saturation de la diode.

$V_{th}$ : tension thermique.

A : coefficient d'idéalité de la diode.

q : charge d'un électron  $1,6 \cdot 10^{-19}$ .

$T_c$  : Température de la jonction.

k : Constante de Boltzmann  $1,38 \cdot 10^{-23}$  (J/k).

**✓ Le facteur de forme FF**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (\text{II. 4})$$

$V_m$  : Tension de point de puissance maximale (V).

$I_m$  : Courant de point de puissance maximale (A).

✓ **Le rendement de conversion d'énergie  $\eta$** 

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = FF \frac{V_m I_{cc}}{P_{in}} \\ \eta = \frac{V_m I_m}{E.S} \\ \eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \end{array} \right. \quad (II. 5)$$

✓ **Point de puissance maximale**

C'est le point  $(V_m, I_m)$  où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (II. 6)$$

✓ **La puissance du flux lumineux incident**

$$P_{in} = S \cdot E_s \quad (II.7)$$

$E_s$  : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $W/m^2$ ).

$S$  : La surface effective des cellules.

✓ **Température de jonction**

La température de la jonction  $T_c$  de la cellule est donnée par la relation suivant :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{800} E \quad (II. 8)$$

NOCT: La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

$T_a$  : La température ambiante.

**II.3.2. Modélisation du panneau photovoltaïque**

Pour trouver le modèle du panneau photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. On présentera quelque modèle de la cellule photovoltaïque:

- Cellule idéale.
- Modèle explicite.
- Modèle à une diode (implicite).
- Modèle à une diode simplifiée.
- Modèle à deux diodes.

### II.3.2.1 Cellule idéale [20]

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode de transition P-N de la cellule PV.

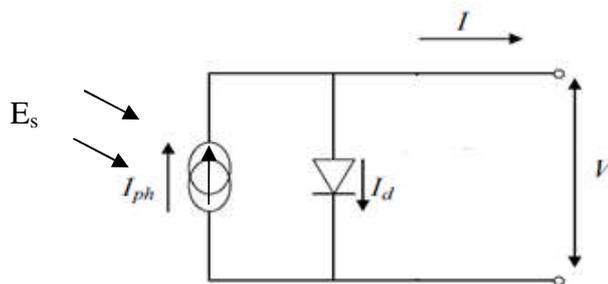


Figure (II.3) : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

Le courant généré par un panneau photovoltaïque est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.9})$$

$$I_d = I_s \cdot e^{\left(\frac{qv}{AKTc} - 1\right)} \quad (\text{II.10})$$

$I$  : courant disponible

$I_{ph}$  : courant produit par la photopile

$v$  : tension aux bornes de la cellule.

$AKT_c / q = 26\text{mV}$  à  $300\text{ °K}$  pour le silicium poly-cristallin ( $V_{th}$ ).

$I_s$  : courant de polarisation de la diode ou courant de saturation.

$A$  : coefficient d'idéalité de la diode.

### II.3.2.2. Modèle explicite

Le modèle explicite est simple du point de vue d'implantation dans des programmes de simulation à savoir les paramètres suivants ( $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$ ).

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) e^{\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (\text{II.11})$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right)} \quad (\text{II.12})$$

$$I = I_{cc} C_1 e^{\left(\frac{V_m}{C_2 V_{oc}} - 1\right)} \quad (\text{II.13})$$

$C_1, C_2$  : Coefficients.

### II.3.2.3. Modèle à une diode (implicite) [21]

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

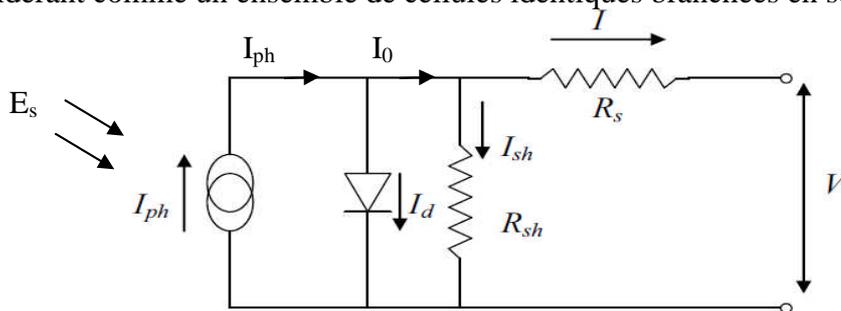


Figure (II.4) : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).

$R_{sh}$  : Résistance shunte qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule. La loi des nœuds nous donne :

$$I = I_0 - I_{sh} \quad (\text{II.14})$$

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_d \quad (\text{II.15})$$

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - I_s e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{AKT_c}\right) - 1} \quad (\text{II.16})$$

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K.T_c}\right)} \quad (\text{II.17})$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E \cdot [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_c - T_{cref})] \tag{II.18}$$

Donc le courant à la sortie de la cellule est le suivant:

$$I = P_1 \cdot E \cdot [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_c - T_{cref})] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} - P_4 T_c^3 e^{-\frac{E_g}{k \cdot T_c}} e^{\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A k T_c}\right) - 1} \tag{II.19}$$

- ✓ k : Constante de Boltzmann.
- ✓ T<sub>c</sub> : Température absolue de la cellule.
- ✓ q : Charge d'un électron.
- ✓ v : Tension aux bornes de la cellule.
- ✓ T<sub>cref</sub> : Température de référence.
- ✓ I<sub>s</sub> : Courant de saturation.
- ✓ E<sub>g</sub> : Energie de gap pour le silicium.
- ✓ E<sub>ref</sub> : Ensoleillement de référence.

Avec : P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, A, R<sub>sh</sub>, R<sub>s</sub> des paramètres qu'il faut déterminer avec l'une des méthodes de résolution numérique.

### II.3.2.4. Modèle simplifié à une diode [22]

On peut simplifier le modèle précédent en un modèle de cinq paramètres (I<sub>sc</sub>, I<sub>mpp</sub>, V<sub>oc</sub>, V<sub>mpp</sub>, R<sub>s</sub>), qu'on peut modéliser comme suite :

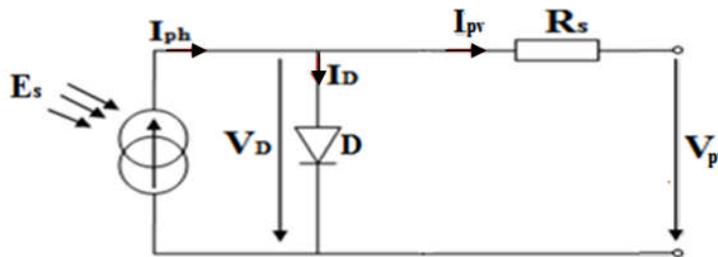


Figure (II.5) : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_{PV} = I_{sc} \cdot [1 - k_1 \cdot (e^{k_2 \cdot V_{PV}^m} - 1)] \tag{II.20}$$

Où les coefficients k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> et m sont donnés par :

$$k_1 = 0,01175$$

$$k_2 = \frac{k_4}{V_{oc}^m} \quad (II.21)$$

$$k_3 = \ln \left[ \frac{I_{sc} \cdot (1+k_1) - I_m}{k_1 \cdot I_{sc}} \right] \quad (II.22)$$

$$k_4 = \ln \left[ \frac{1+k_1}{k_1} \right] \quad (II.23)$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{k_3}{k_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_m}{V_{oc}} \right]} \quad (II.24)$$

### II.3.2.5. Modèle à deux diodes [20]

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter le phénomène de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient :

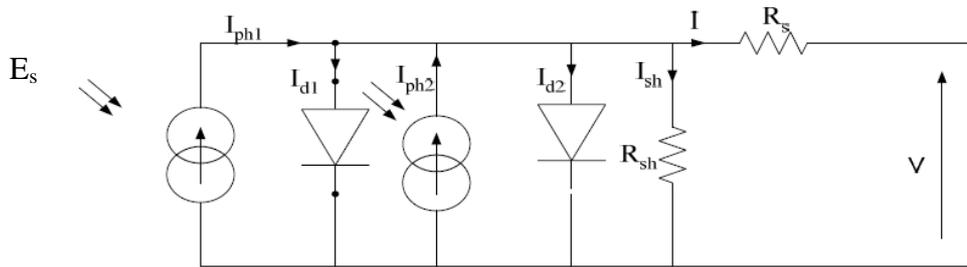


Figure (II.6) Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (deux diodes).

$$I = (I_{ph1} + I_{ph2}) - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (II.25)$$

$$I_{d1} = I_{s1} e^{\frac{(V+R_s \cdot I)}{A \cdot V_{th}}} \quad (II.26)$$

$$I_{d2} = I_{s2} e^{\frac{(V+R_s \cdot I)}{2A \cdot V_{th}}} \quad (II.27)$$

$$V_{th} = \frac{AKT_c}{q} \quad (II.28)$$

$$I_{ph} = I_{ph1} + I_{ph2} \quad (II.29)$$

$$I_{s1} = P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_c}\right)} \quad (II.30)$$

$$I_{s2} = P_5 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K \cdot T_c}\right)} \quad (II.31)$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E \cdot [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_c - T_{tcref})] \quad (II.32)$$

$$I = P_1 \cdot E \cdot [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_c - T_{tcref})] - P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{k.T_c}\right)} - P_5 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{k.T_c}\right)} - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (II.33)$$

Avec :  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, A, R_{sh}, R_s$  des paramètres qu'il faut déterminer avec l'une des méthodes de résolution numérique.

#### II.4. Modélisation du générateur photovoltaïque [23]

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte. Nous avons choisi un modèle simplifié utilisé dans la littérature, c'est un modèle à une diode simplifié à cinq paramètres ( $I_{cc}, V_{oc}, I_{mpp}, V_{mpp}, R_s$ ) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

L'association série/parallèle de  $n_s, n_p$  cellules photovoltaïques élémentaires détermine le module photovoltaïque.  $n_s$  étant le nombre de cellules en série sur une branche et  $n_p$  le nombre de branches en parallèle. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant  $I_{pv}$  sous une tension  $V_{pv}$  :

$$\begin{cases} V_{pv} = n_s \cdot V'_{pv} \\ I_{pv} = n_p \cdot I'_{pv} \end{cases} \quad (II.34)$$

Avec : ( $V'_{pv}, I'_{pv}$ ) : tension et courant d'une cellule photovoltaïque.

#### II.5. Identification de panneau photovoltaïque

Le système photovoltaïque est constitué de six panneaux solaire de marque SHARP NTR5E3E (deux en série, trois en parallèle). Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau ( $I_{sc}, I_{mpp}, V_{oc}, V_{mpp}$ ) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ , 1.5 AM). Le tableau (II.1) montre les paramètres d'un panneau solaire fourni par le constructeur :

Tableau (II.1) : Paramètres d'un panneau photovoltaïque SHARP NTR5E3E

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau $P_{mpp}$	175W
Courant au point de puissance maximale $I_{mpp}$	4.95A
Tension au point de puissance maximale $V_{mpp}$	35.4V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	5.4A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	44.4V
Nombres de cellules photovoltaïques	72

Les panneaux (ou modules) SHARP NTR5E3E qui font l'objet de cette étude expérimentale sont constitué de 72 cellules monocristallin. Pour déterminer les caractéristiques (V-I) et (V-P), plusieurs points de tension et de courant ont été relevé, dans les conditions réelle de son fonctionnement en utilisant la méthode volt-ampèremétrique en alimentant une résistance variable par le panneau (Figure II.7).

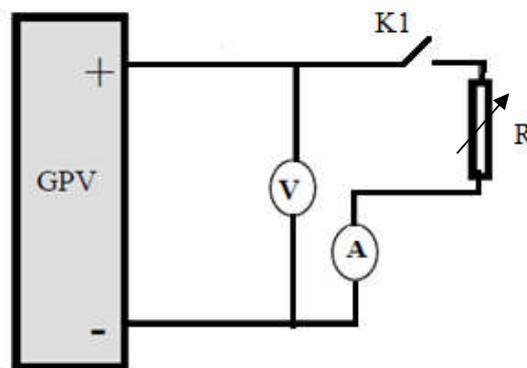


Figure (II.7) : Schéma de principe du procédé d'identification des paramètres du panneau photovoltaïque

On mesure l'ensoleillement et la température pour chaque valeur de la résistance (R) lorsque en ferme l'interrupteur K1 et on relève le courant et la tension du panneau alors on obtient plusieurs couples de valeurs de tension et de courant. Le capteur photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques courant-tension ( $I=f(V)$ ), Cette modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu par le capteur. Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée, dépend uniquement de l'éclairement et de la

température de la cellule. Les courbes de puissance obtenue admettent des points maximum, ces points correspondent aux points de puissances maximales ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) lorsque l'irradiation varie pour une température donnée.

Les figures (II.8, 9, 10, 11 et 12) montrent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque pour trois irradiances et trois températures différentes, obtenues lors de l'identification expérimentale du panneau photovoltaïque. Les courbes en bleu représentent les résultats obtenus expérimentalement et les courbes en rouge sont obtenues par simulation (Matlab/simulink).

Selon les résultats de la comparaison des caractéristiques électriques de ces panneaux, La nature non linéaire des panneaux photovoltaïque apparaît et cette différence est due aux courants de fuites de la diode dans la cellule PV (Figure II.5). Cependant, un algorithme de poursuite du point de puissance maximale peut être incorporé pour forcer le système à toujours fonctionner en ce point (MPPT).

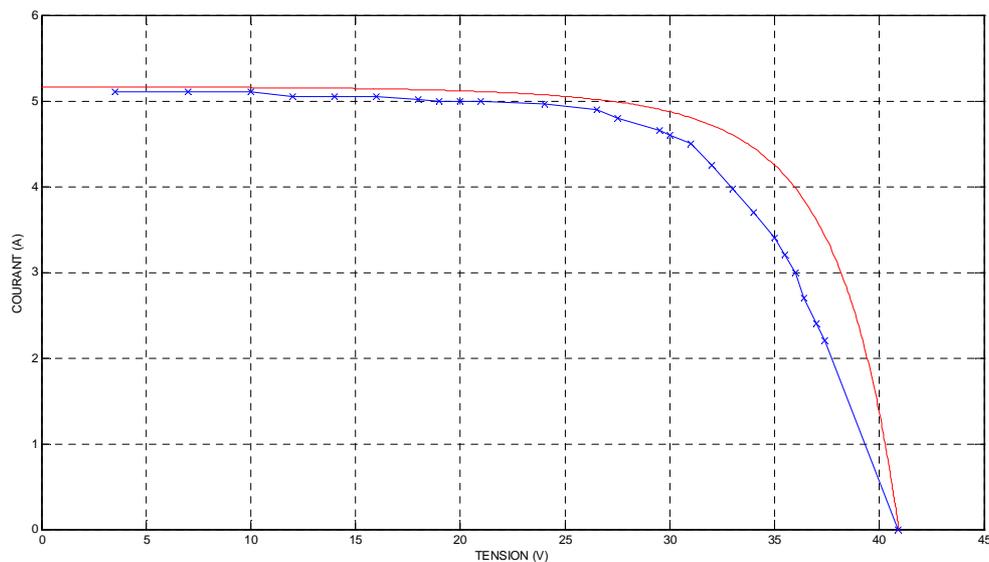


Figure (II.8) : Caractéristique (V-I) d'un module photovoltaïque ( $E=950W/m^2$ ,  $T=27^\circ$ )

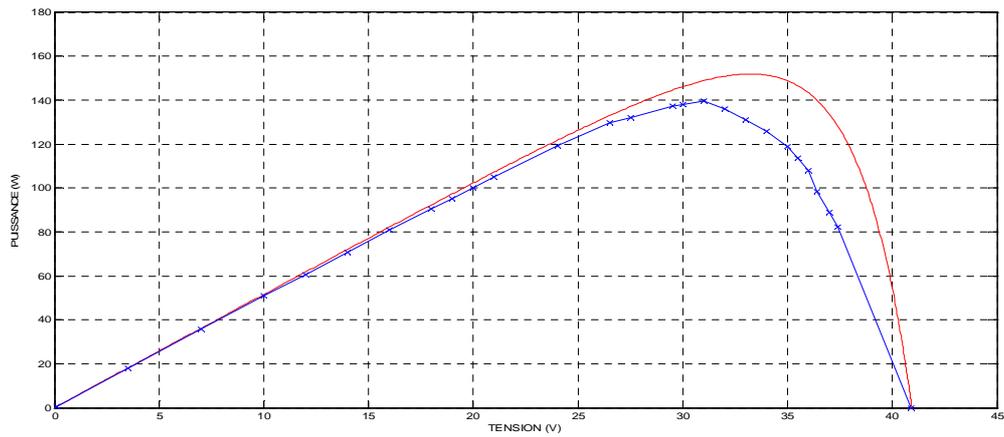


Figure (II.9) : Caractéristique (P-V) d'un module photovoltaïque ( $E=950W/m^2$ ,  $T=27^\circ$ )

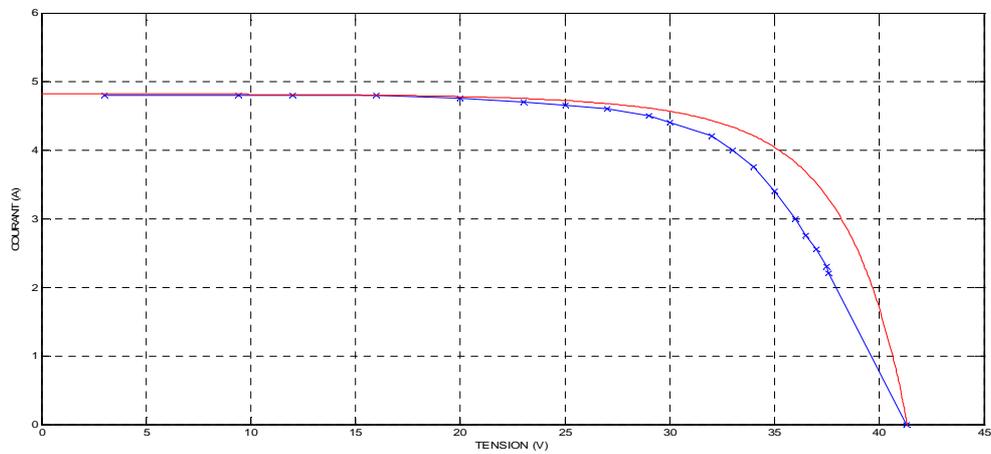


Figure (II.10) : Caractéristique (V-I) d'un module photovoltaïque ( $E=888 W/m^2$ ,  $T=30.5^\circ$ )

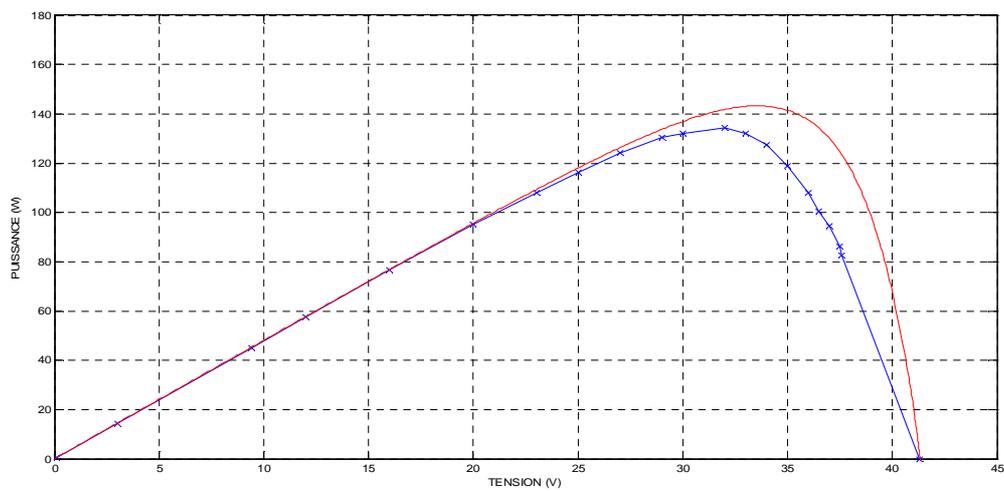


Figure (II.11) : Caractéristique (P-V) d'un module photovoltaïque ( $E=888W/m^2$ ,  $T=30.5^\circ$ )

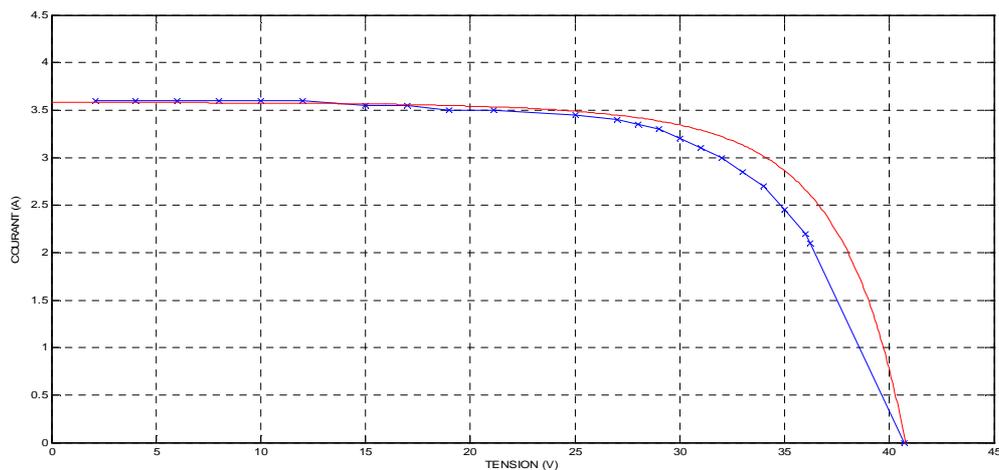


Figure (II.12) : Caractéristique (V-I) d'un module photovoltaïque ( $E=650\text{W/m}^2$ ,  $T=27.6^\circ$ )

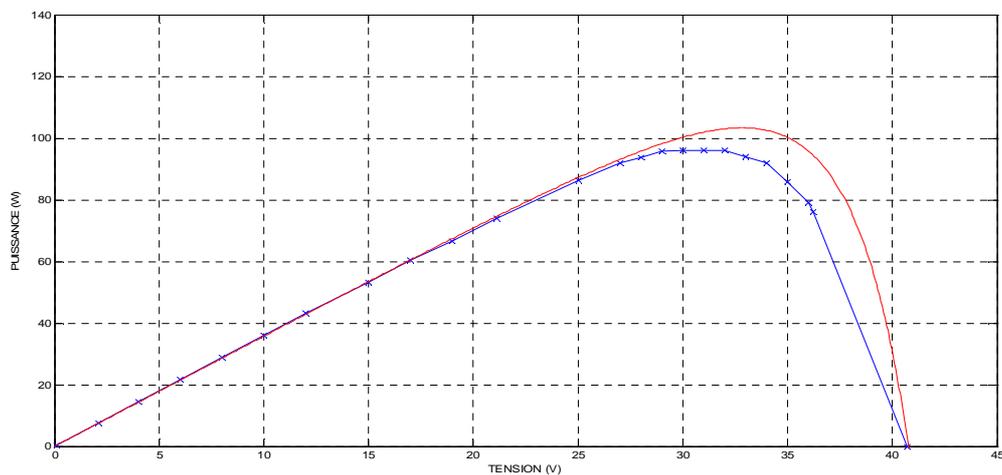


Figure (II.13) : Caractéristique (P-V) d'un module photovoltaïque ( $E=650\text{W/m}^2$ ,  $T=27.6^\circ$ )

Dans cette partie, nous avons analysé sous le logiciel Matlab Simulink et caractérisé le fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques SHARP. Les résultats obtenus montrent que la symbolisation du générateur PV dans Simulink permet de déterminer le fonctionnement électrique optimal du générateur PV en fonction de la charge et des conditions météorologiques (éclaircissements,...).

A partir de la caractérisation électrique des panneaux SHARP, et en tenant compte du réajustement de ces paramètres par rapport à celle du constructeur, nous avons constaté une dégradation des performances électriques optimales des panneaux. Cette dégradation peut atteindre au moyenne 15 %.

## II.6 Influence de l'éclairement et de la température sur le courant et la tension

Pour montrer l'influence de l'éclairement et de la température sur le courant et la tension, nous avons déterminé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux d'irradiations ( $E_s=400, E_s=600, E_s=800, E_s=1000 \text{ W/m}^2$ ) à température constante et à différentes températures ( $T_c = 0^\circ, 25^\circ, 50^\circ, 75^\circ$ ), à une irradiation constante.

Les figures (II.14 et II.15) montrent bien la variation du courant du panneau photovoltaïque ainsi que la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut constater aussi sur le graphe, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales ( $V_{opt}, I_{opt}$ ) lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut considérer que le courant de court circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation (figure (II.14)). De même, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (à vide) varie très peu. Par contre lorsque la température croît à l'irradiation constante (figure (II.16)), la tension  $V_{oc}$  décroît quand la température augmente et le courant  $I_{cc}$  croît légèrement.

### a) Influence de l'irradiation

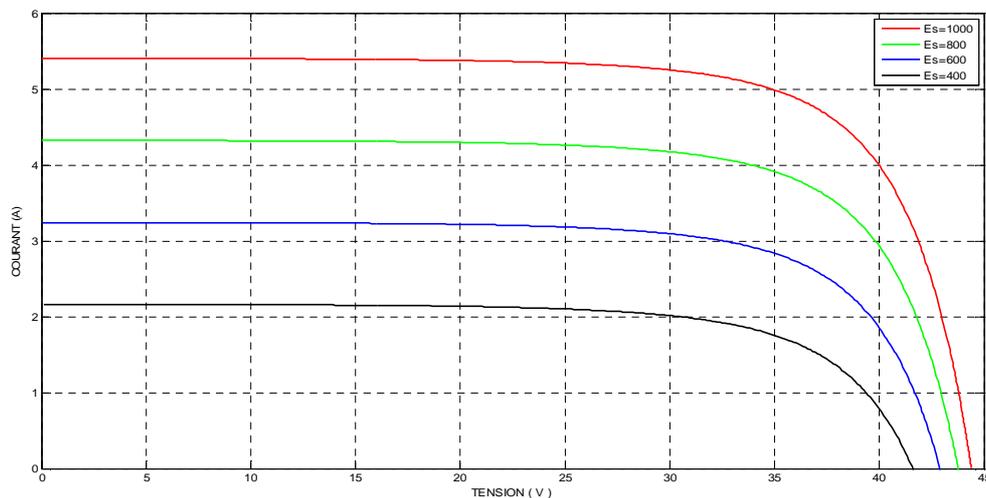


Figure (II.14) : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiation ( $E_s = 400, E_s = 600, E_s = 800, E_s = 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T_c = 25^\circ\text{C}$

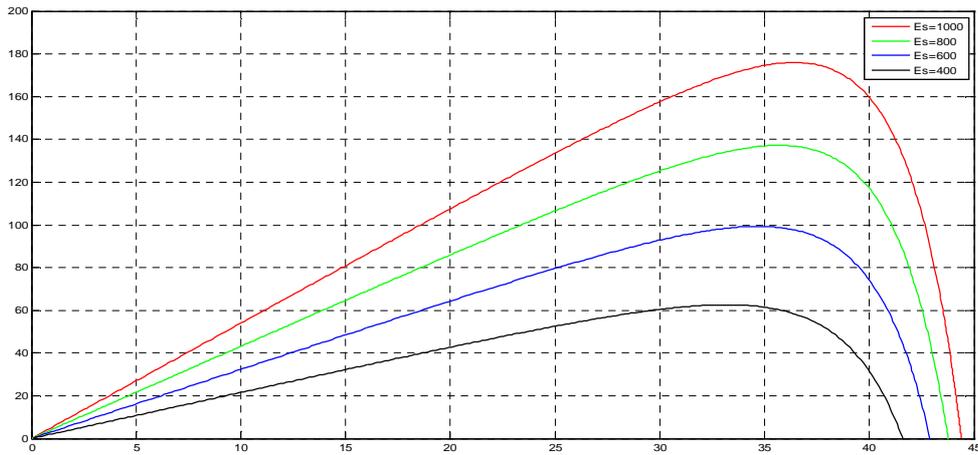


Figure (II.15) : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiation ( $E_s = 1000, E_s = 800, E_s = 600, E_s = 400$  W/m<sup>2</sup>) et  $T_c = 25^\circ\text{C}$

b) Influence de la température

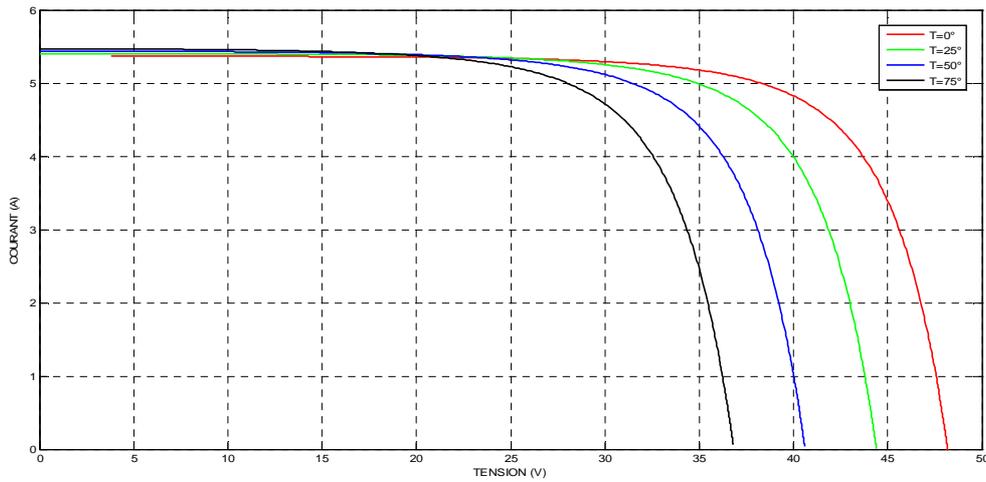
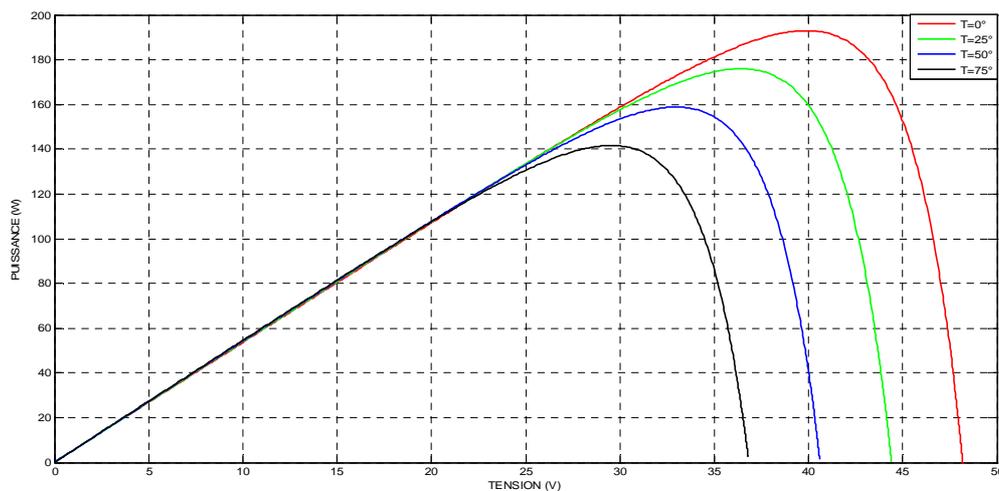


Figure (II.16) : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux de température ( $T_c = 0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et  $E_s = 1000\text{W/m}^2$



**Figure (II.17) : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour différents niveaux de température ( $T_c = 0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et  $E=1000\text{W/m}^2$**

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale des différentes parties du système de conversion photovoltaïque. Dans un premier temps, nous avons commencé l'étude par détailler les caractéristiques d'un GPV ; ensuite, une présentation de différents modèles mathématiques des panneaux photovoltaïques, avec la simulation du modèle à une diode simplifiée en utilisant les paramètres fournis par le constructeur. Puis on a procédé à l'identification des différents paramètres du panneau photovoltaïque en caractérisant les courbes (V-I) et (V-P).

# Chapitre III

*Etude et simulation de la chaîne de  
conversion éolienne.*

### III.1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus d'une manière générale pour une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et à la simulation de la chaîne de conversion éolienne.

### III.2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

#### III.2.1. Constitution de la chaîne éolienne

La chaîne éolienne à étudier est représenté sur la figure (II.1) :

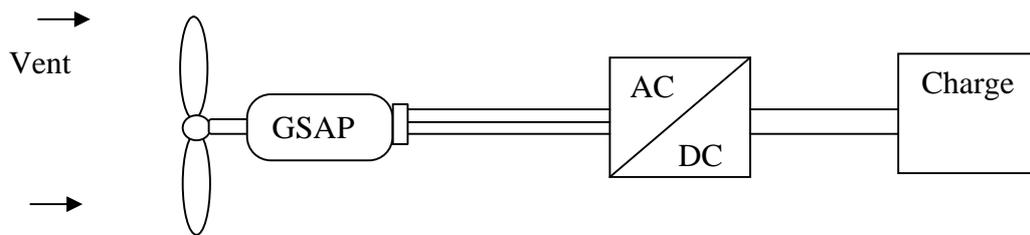


Figure (III.1) : Schéma simplifié du système de conversion éolien à étudier

#### III.2.2. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents [1]

La machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne pour son couple massique. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices:

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

**III.2.2.1. Les équations de la machine dans le repère abc**

La machine synchrone à aimants permanents est à rotor lisse, dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Le neutre est isolé et la somme instantanée des courants de phase est nulle.

- Les équations des tensions et de flux sont données par :

$$[V_{abc}] = [R_s] \cdot [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (\text{III.1})$$

$$[V_{abc}] = [R_s] \cdot [I_{abc}] + [L] \cdot \frac{d}{dt} [I_{abc}] + [E_{abc}] \quad (\text{III.2})$$

Avec

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_{fa} \\ \varphi_{fb} \\ \varphi_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{fa} \\ \varphi_{fb} \\ \varphi_{fc} \end{bmatrix} = \varphi_f \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Et

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Et } [V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Où :

$V_{abc}$  : Les tensions de phase statorique de la machine.

$I_{abc}$  : Les courants de phase statorique de la machine.

$L$  : Inductance propre de chaque phase.

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique.

$M$  : Inductance mutuelle entre deux phases au stator.

$\varphi_{fabc}$  : flux statorique.

$E$  : Force électromotrice.

$\varphi_f$  : Amplitude du flux de l'aimant permanent.

- L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{p}{\omega} \cdot (E_a \cdot I_a + E_b \cdot I_b + E_c \cdot I_c) \tag{III.7}$$

Où :

p : Le nombre de paire de pôle.

$\omega$  : La vitesse électrique de la machine.

### III.2.2.2. Les équations de la machine dans le repère dq

Pour passer d'un système d'enroulement triphasé « abc » à un système biphasé « dq » équivalent, on utilise la transformation de Park.

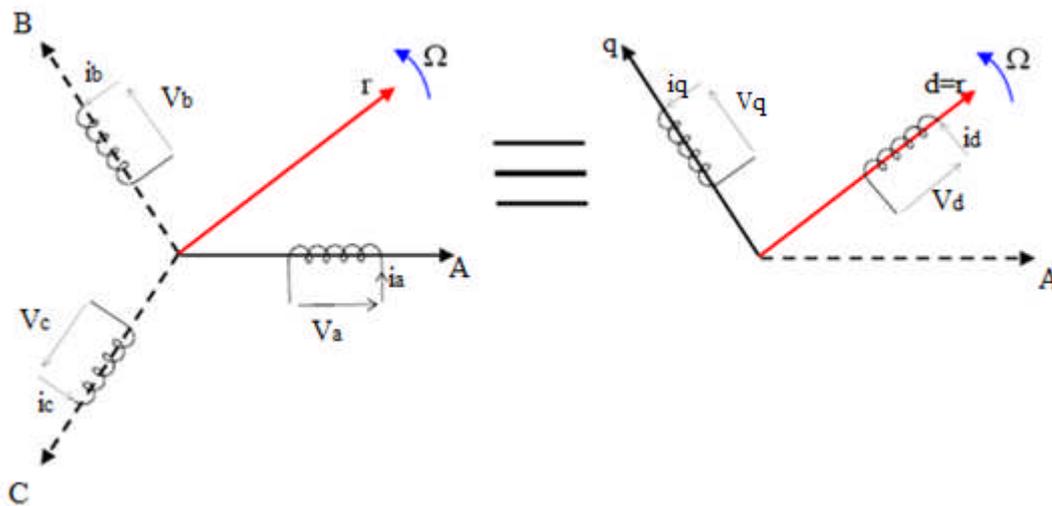


Figure (III.2): Passage du repère (a,b,c) du stator au repère (d, q) de Park

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \Leftrightarrow [X_{abc}] = [P(\theta)]^t \cdot [X_{dq0}] \tag{III.8}$$

Avec :

O Composante homopolaire

X, x Tensions, flux ou courants

$[P(\theta)]^t$  Matrice de Park transposée.

$\theta$  Angle que fait l'axe « a » avec l'axe « d »

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

On définit les vecteurs flux  $[\varphi_{abc}]$  et courant  $[i_{abc}]$  statoriques en fonction de  $[\varphi_{dq0}]$  et  $[i_{dq0}]$  comme suit :

$$[\varphi_{abc}] = [P(\theta)]^t \cdot [\varphi_{dq0}] \quad \Leftrightarrow \quad [\varphi_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [\varphi_{abc}] \quad (\text{III.10})$$

$$[i_{abc}] = [P(\theta)]^t \cdot [i_{dq0}] \quad \Leftrightarrow \quad [i_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [i_{abc}] \quad (\text{III.11})$$

➤ Les équations relatives au flux dans le repère dq sont :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d \cdot i_d + \sqrt{\frac{2}{3}} M_f I_f \\ \Psi_q = L_q \cdot i_q \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Avec

$$\varphi_f = \sqrt{\frac{2}{3}} M_f I_f \quad (\text{III.13})$$

➤ Les équations relatives aux tensions dans le repère dq sont :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q \\ V_q = R \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot \Psi_d \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

➤ L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = P \cdot (i_q \cdot \Psi_d - i_d \cdot \Psi_q) \quad (\text{III.15})$$

En remplaçons la relation (13) dans (16) on aura :

$$C_{em} = P \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \varphi_f \cdot i_q] \quad (\text{III.16})$$

la MSAP est à pôles lisses ( $L_d=L_q$ ), alors l'expression du couple sera:

$$\begin{cases} C_{em} = P \cdot \varphi_f \cdot i_q \\ C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \end{cases} \quad (III.17)$$

Avec  $\Omega = \frac{\omega}{P}$

$P_{em}$  : La puissance électromagnétique de la machine.

$\Omega$  : Vitesse de rotation de la machine en (rad/s).

$\omega$  : Pulsation des courants statoriques en (rad/s).

### III.2.3. Modélisation du redresseur (PD3) [14]

Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions triphasées. Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque  $D_1$  conduit l'une des deux diodes  $D_2'$  et  $D_3'$  conduit également; il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$ . Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \max ( V_j ) - \min ( V_j ); j=1, 2, 3.$$

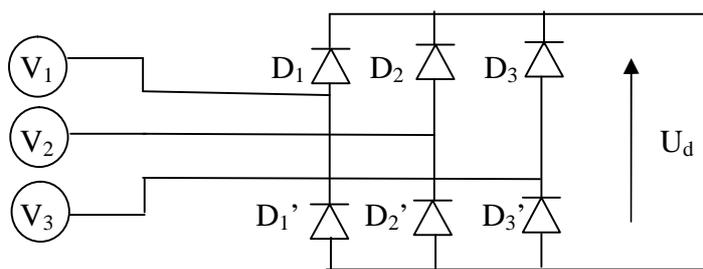


Figure (III.3) : Redresseur PD3 à diodes

### III.3. Simulation de la chaîne de production éolienne

Afin de simuler la chaîne de conversion éolienne, on a utilisé une machine synchrone à aimants permanents de 600 W. Les paramètres de cette machine sont illustrés dans le tableau si dessous :

Tableau (III.3) : paramètre de la GSAP [2]

Tension nominale	$V_n = 90V$
Puissance nominale	$P_n = 600 W$
Courant nominale	$I_n = 4.8A$
Nombre de paires de pôles	$p = 17$
Résistance des enroulements	$R_s = 1.137\Omega$
Inductance synchrone	$L_s = 2.7 mH$
Flux efficace	$\Phi_{eff} = 0.15 Wb$
Coefficient de frottement	$f = 0.06 N.m.s/rad$
Inertie	$J = 0.1 N.m$

La figure (III.4) résume l'ensemble de la chaîne éolienne étudié. La figure (III.5) représente l'allure de vitesse d'entraînement appliquée à la machine synchrone à aimant permanent. Le temps de simulation totale est réparti en trois phases de fonctionnement. A  $t=2S$  en diminue la vitesse puis à  $t=4s$  on augmente la charge.

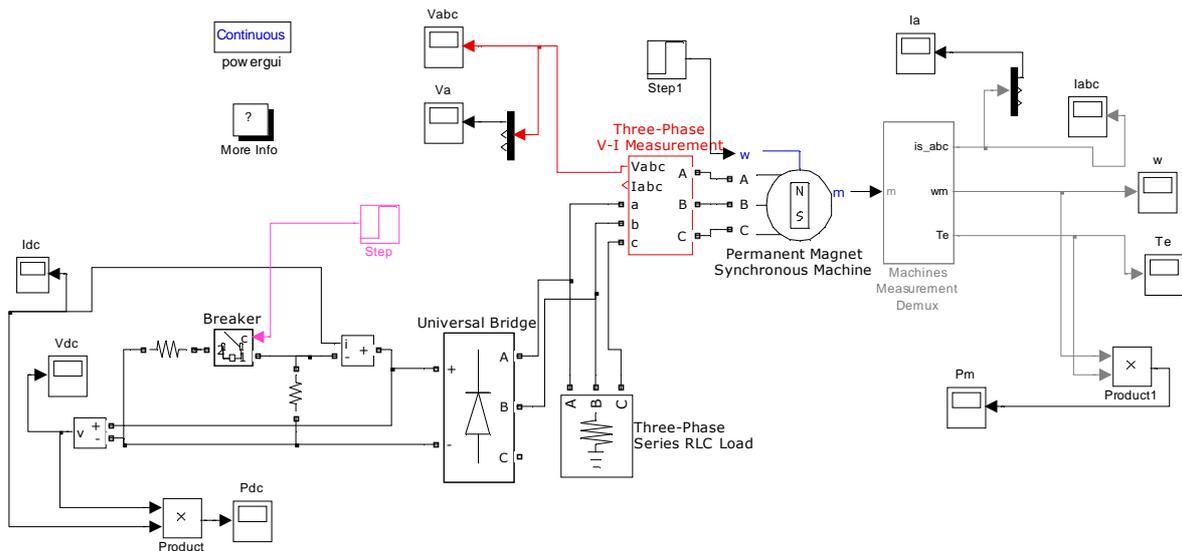
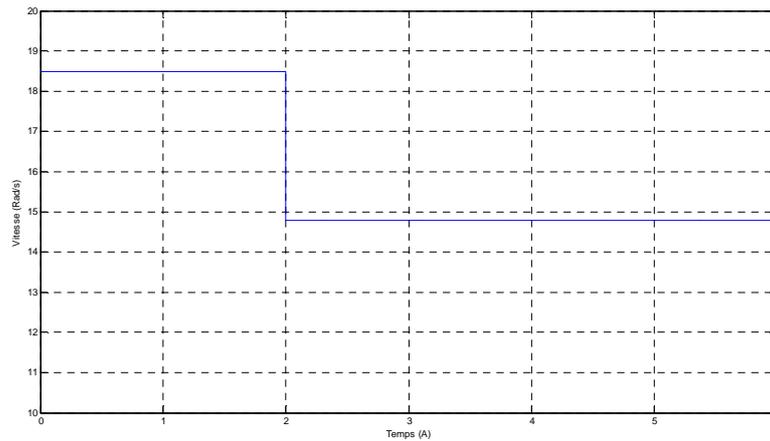


Figure (III.4) Schéma bloc du système éolien étudié



**Figure (III.5) : Allure de la vitesse appliquée à MSAP**

Les résultats obtenus en appliquant cet échelon de vitesse, sont présentés sur les figures ci-dessous.

Le couple électromagnétique et la puissance mécanique de la génératrice sont représentés respectivement sur les figures (III.6) et (III.7). Les deux allures montrent qu'ils sont affectés par la variation de la vitesse et de la charge.

Les figures (III.8) de la tension et (III.10) du courant statorique, montrent que la tension est très affectée par la variation de la vitesse, et peu affectée par la variation de la charge. Par contre le courant varie lors de la variation de la charge. Cette variation lors de la variation de la vitesse est dû à la variation de la tension. La forme de la tension obtenue comme on peut le prévoir, n'est pas sinusoïdale à cause de la présence du redresseur à diode (la chute de tension dans les interrupteurs, l'empiètement). Vu la nature résistive de la charge de la charge l'allure du courant suit celle de la tension.

Les figures (III.12) de la tension redressée, (III.14) du courant redressé et (III.16) de la puissance électrique à la sortie du redresseur, montrent qu'ils suivent dans leurs variations la tension, le courant statorique et la puissance mécanique respectivement.

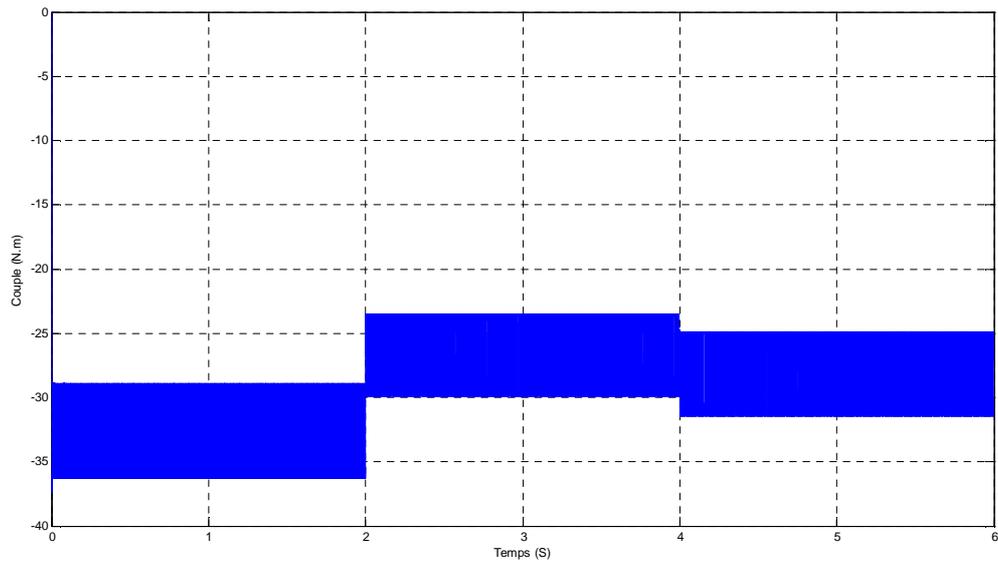


Figure (III.6) : Allure du Couple électromagnétique de la GSAP

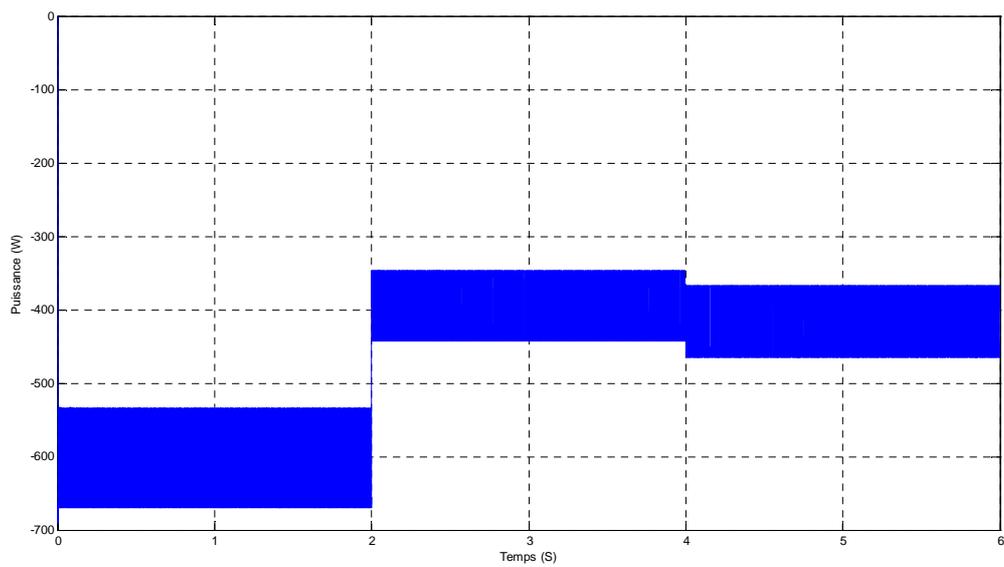


Figure (III.7): Allure de puissance mécanique de la GSAP

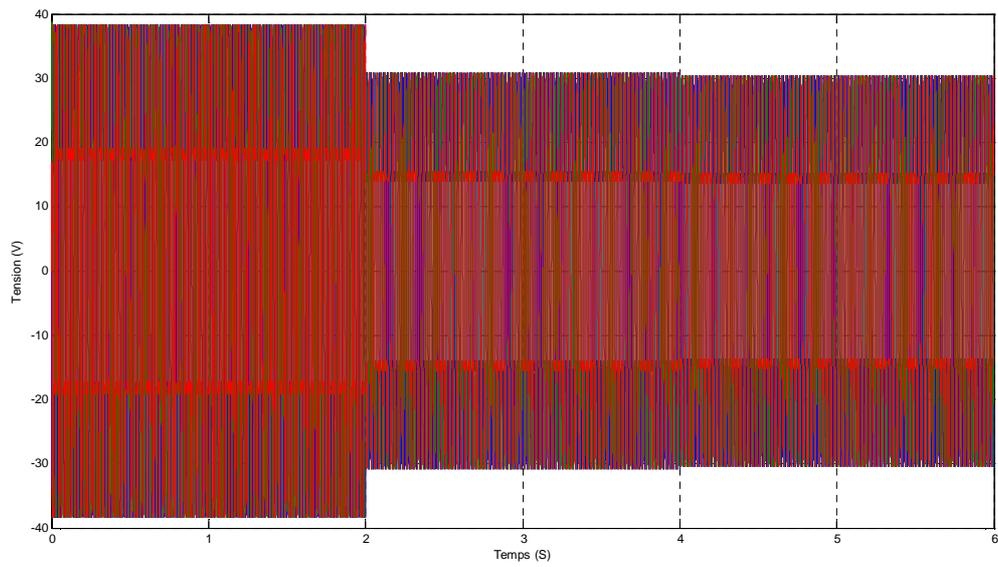


Figure (III.8) : Allures des tensions statorique ( $V_{abc}$ )

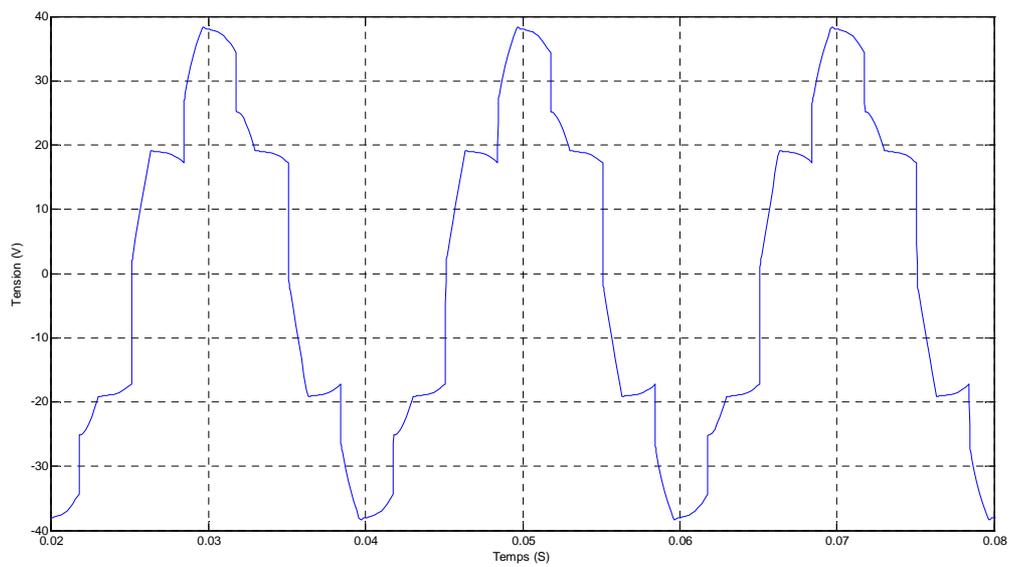


Figure (III.9) : Zoom sur l'allure de la tension statorique ( $V_a$ )

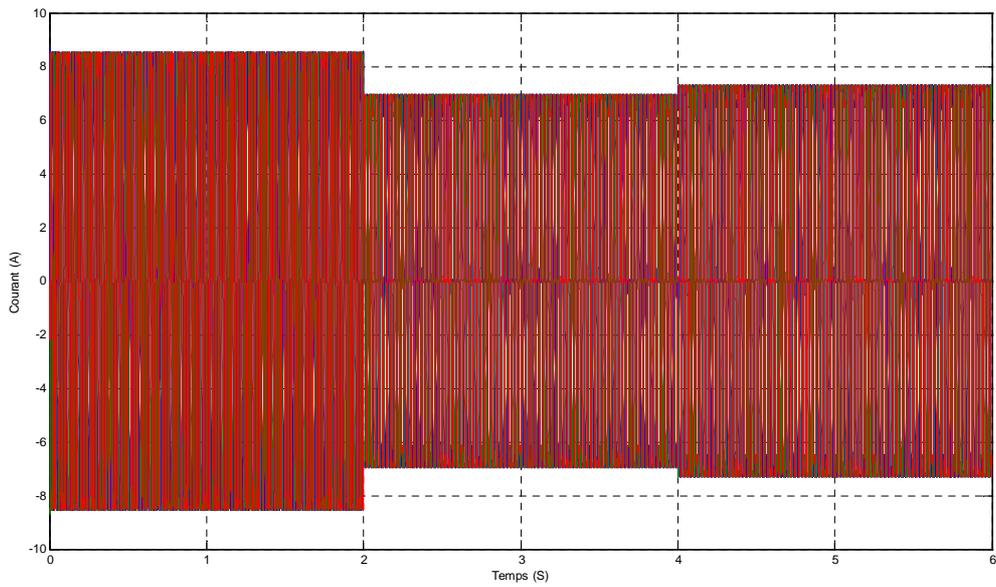


Figure (III.10) : Allures des courants statorique ( $i_{abc}$ )

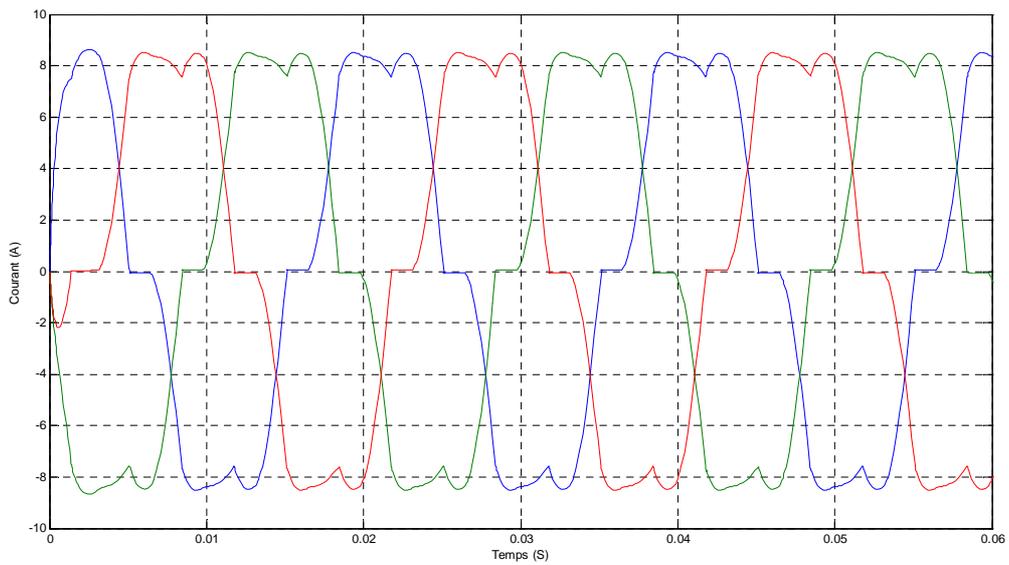


Figure (III.11) : Zoom sur l'allure des courants statorique ( $i_{abc}$ )

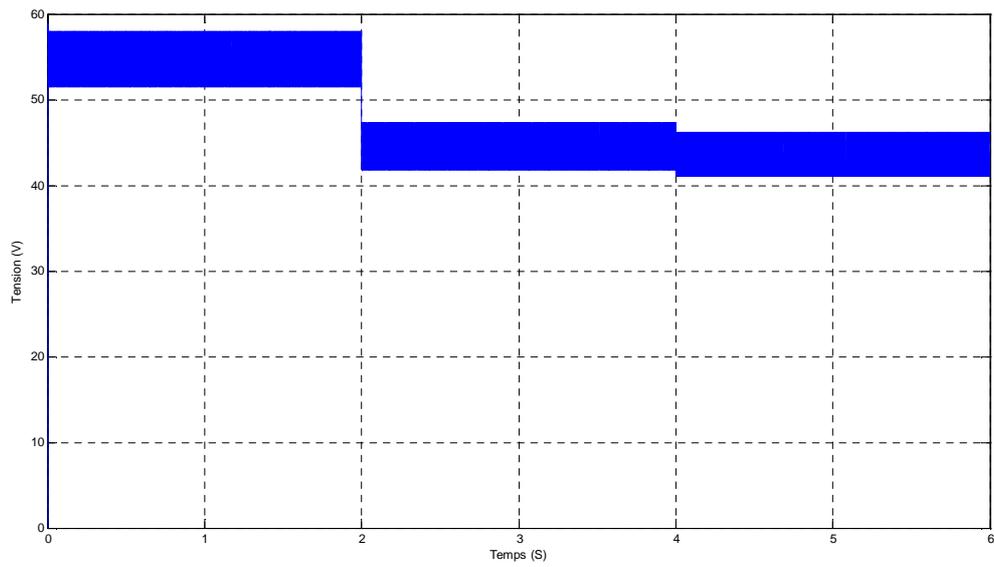


Figure (III.12) : Allure de tensions redressées ( $V_{dc}$ )

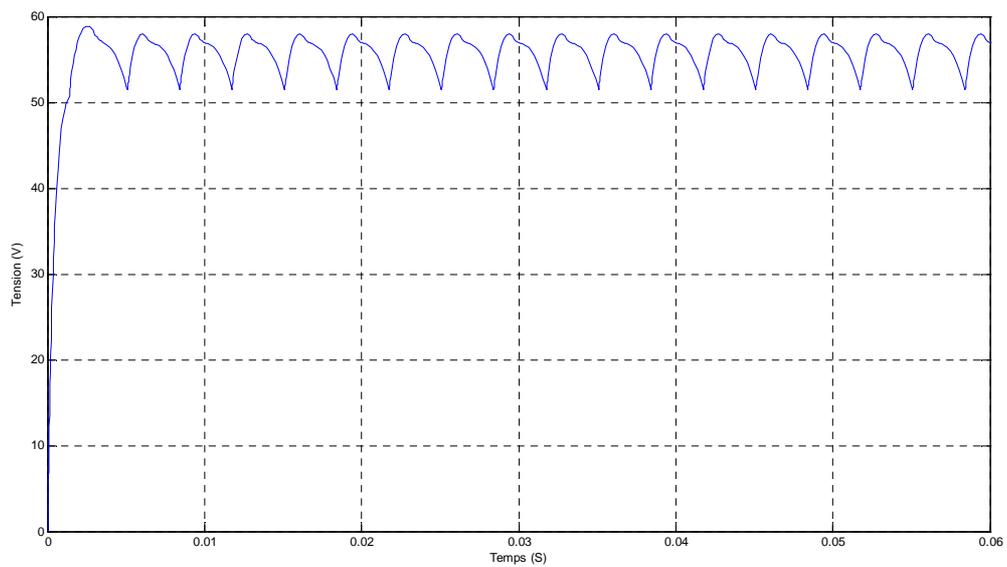


Figure (III.13) : Zoom sur l'allure de la tension redressée ( $V_{dc}$ )

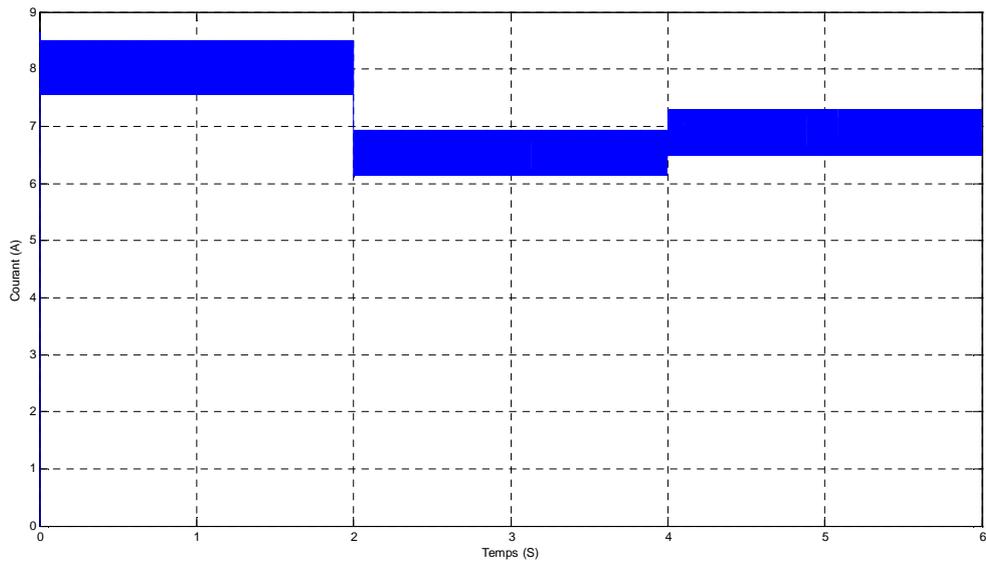


Figure (III.14) : Allure du courant redressé ( $I_{dc}$ )

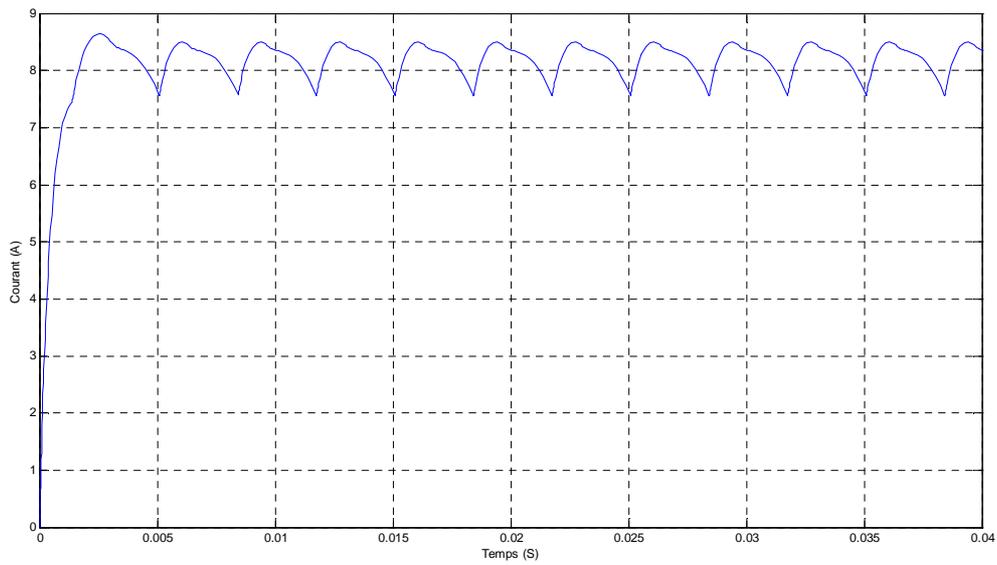


Figure (III.15) : Zoom sur l'allure du courant redressé ( $I_{dc}$ )

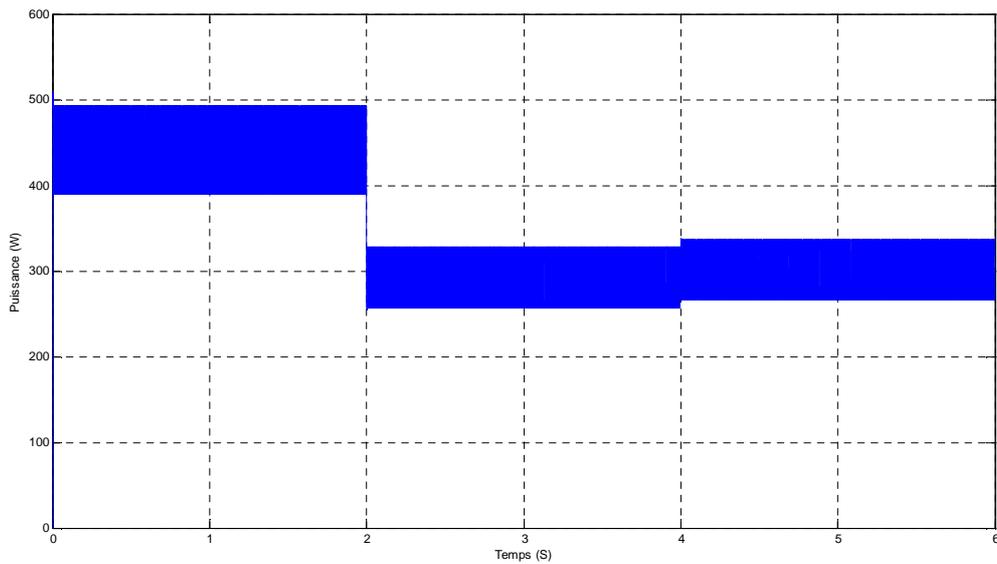


Figure (III.16) : Allure de la puissance électrique

### III.4 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur PD3). Les résultats de la simulation réalisée ont été présentés et commentés.

# Chapitre IV

*Etude et simulation de la  
chaîne hybride*

## IV.1. Introduction

Le système hybride de production de l'énergie en générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'origine renouvelables.

Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux chaînes de conversion d'énergies :

- a- éolienne (qui est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice synchrone à aimants permanents et un redresseur PD3).
- b- photovoltaïque (qui est constitué d'un générateur photovoltaïque et un régulateur de charge).

Les deux systèmes fonctionnent hors réseaux électriques (autonome).

Il existe deux types de système de production hybride (éolienne, photovoltaïque), système sérié et système parallèle. Le système choisi dans notre étude, est réalisé de telle sorte à obtenir un fonctionnement parallèle des deux sources qui sont reliés à un système de stockage électrochimique (figure IV.1).

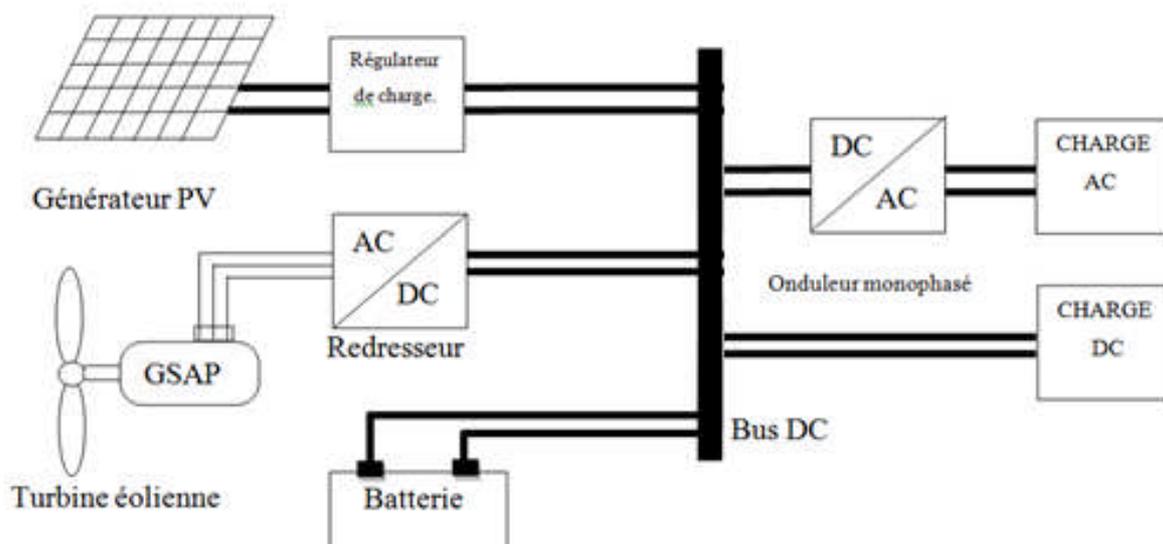


Figure (IV.1) : Schéma simplifié d'un système hybride autonome

## IV.2. Modélisation de la batterie [23]

La batterie joue un rôle important en termes de stockage dans les installations hybride. Différents modèles mathématiques existent. Les modèles qui existent en général ne peuvent pas reprendre exactement le comportement réel de la batterie, car il y'a beaucoup de facteurs qui influent sur cette dernière .On cite par exemple :

- La température.
- Le comportement des matériaux de construction de la batterie.
- Le domaine d'application ou d'exploitation de la batterie.

Le choix du modèle est une opération nécessaire, car tous les modèles se différencié l'un par rapport à l'autre, de la manière de prise en compte de donnés et de la supposition des théories parmi ces modèles on cite:

### ➤ Modèle idéal de la batterie

Dans ce modèle, la batterie est représentée par une simple source de tension comme un circuit équivalent et les paramètres internes sont ignorés.

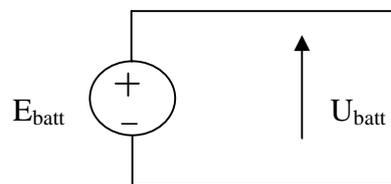


Figure (IV.2) : Schéma idéal de la batterie

### ➤ Modèle simplifié de batterie

Le modèle simplifié de batterie utilise la tensions à vide  $E_{batt}$  en série avec la résistance interne  $R_{batt}$ . Il ne tien pas compte de variations de l'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge et de la température.

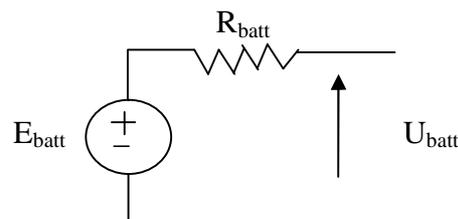


Figure (IV.3) : Schéma simplifié de la batterie

➤ **Modèle CIEMAT**

Ce modèle est basé sur le schéma électrique du modèle électrochimique de la batterie. Celle ci est alors décrite par deux éléments, une source de tension et une résistance interne ( $R_{batt}$ ) dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres (température et état de charge). Pour un nombre de cellules  $n_b$ , l'équation de la tension est :

$$U_{batt} = n_b \cdot E_{batt} \pm n_b \cdot R_{batt} \cdot I_{batt} \tag{IV.1}$$

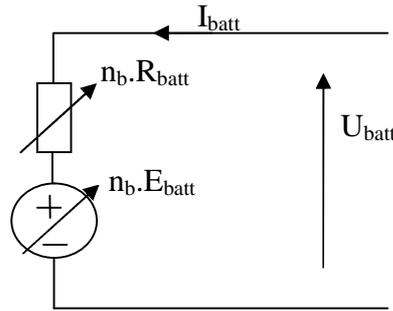


Figure (IV.4) : Schéma de la batterie avec le model CIEMAT

- $U_{batt}$ : Tension de la batterie.
- $I_{batt}$ : Courant de la batterie.
- $E_{batt}$ : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie noté (EDC).
- $R_{batt}$ : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

➤ **Modèle de Thévenin**

Ce modèle se compose d'une tension de circuit ouvert ( $E_{batt}$ ), une résistance interne ( $R_{batt}$ ) et une combinaison parallèle de capacité  $C_0$  et une résistance  $R_0$  comme le montre la figure (II.5).

- $C_0$  : représente la capacité des électrodes parallèles.
- $R_0$  : représente la résistance non linéaire due au contact de l'électrode et de l'électrolyte.

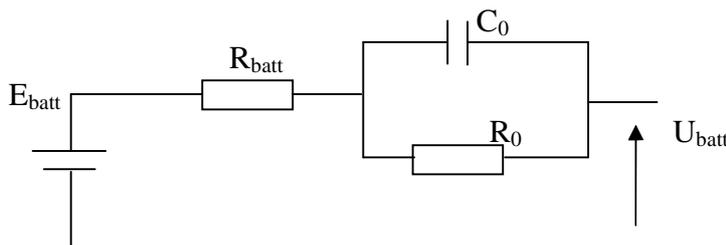


Figure (IV.5) : Modèle de Thévenin de batterie

- Son inconvénient et que tous les éléments sont supposés constant, mais en fait toutes les valeurs sont en fonction des conditions de charge de la batterie.

### VI.3 Simulation du système Hybride

Le système hybride étudié est constitué d'une éolienne, d'un générateur photovoltaïque et des batteries de stockage. Ce système alimente une charge résistive, reliée au bus continu.

Dans ce système le générateur photovoltaïque sert uniquement pour charger les batteries, la charge est alimentée par la source d'énergie éolienne, si l'énergie produite par l'éolienne est suffisante pour alimenter la charge, dans ce cas les batteries ne fournissent aucune énergie pour la charge si non le manque d'énergie par rapport à celle demandé par la charge sera fournie par les batteries.

Vu la difficulté de simuler le système globale à un temps qui reflète le temps réel (des heures) qu'il faut pour la charge et la décharge des batteries, on a décomposé le système globale en deux systèmes qui reflète le comportement du système globale.

Le premier système est constitué d'un générateur photovoltaïque et des batteries, ce système alimente une charge. La simulation de ce système va montrer le comportement des batteries (variation des courants de charge et décharge) selon la source photovoltaïque et la charge. Ce système peut être simulé à des temps qui peuvent atteindre des heures.

Le deuxième système est constitué d'une éolienne, d'un redresseur à diode, des batteries et d'une charge reliée au bus continu. La simulation de ce système va être limitée à quelques secondes. L'objectif de cette simulation est de reproduire le comportement du système hybride (éolienne et batteries chargé par un système photovoltaïque) envers la charge.

#### VI.3.1 Simulation du système photovoltaïque-batteries

Le schéma bloc du système photovoltaïque-batteries alimentant une charge étudié est représenté sur la figure (IV.6). Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink sont représentés ci-dessous :

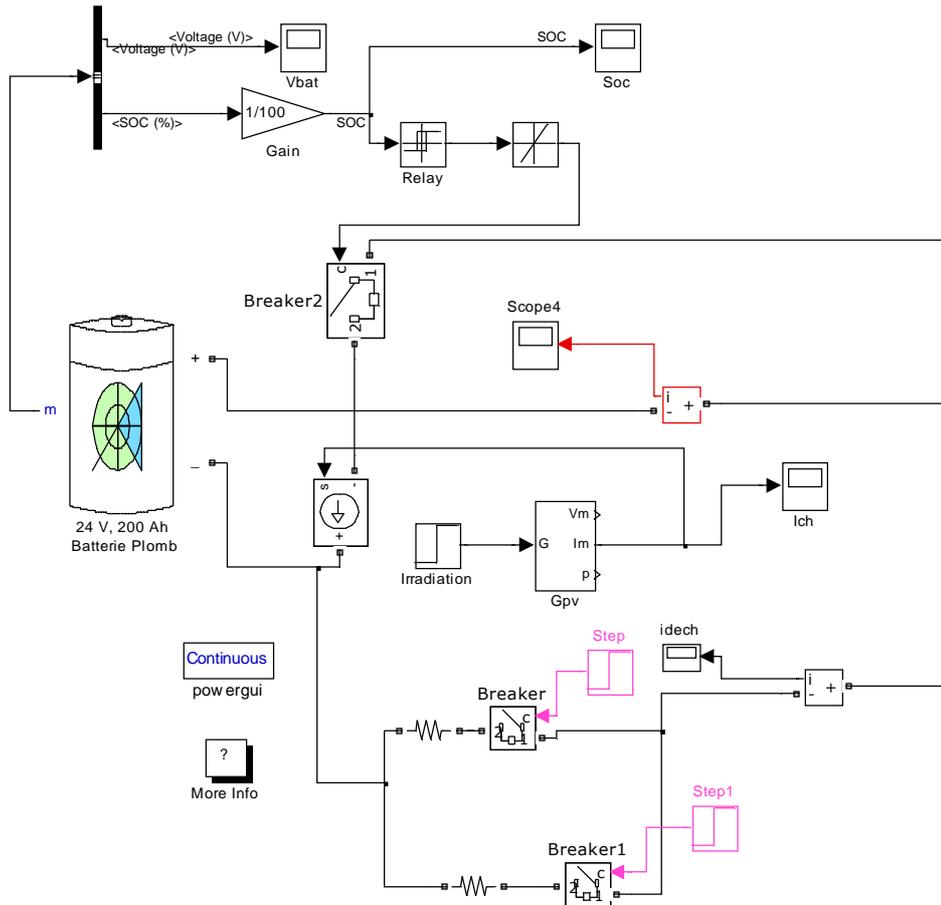


Figure (IV.6) : Schéma bloc de charge et décharge des batteries

Pour montrer la variation des courants de charge et de décharge de la batterie en fonction des variations de l'éclairement et de la charge. On a appliqué un échelon pour la variation de l'éclairement et un autre pour la variation de la charge, toute en gardant la température de jonction des panneaux photovoltaïques constants ( $T_c=25^\circ\text{C}$ ).

On a simulé le système étudié à un temps de dix heures (36000s). On a appliqué une irradiation de  $500 \text{ W/m}^2$  de  $t=0\text{s}$  jusqu'au  $t=12000\text{s}$  puis une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  de  $t=12000\text{s}$  jusqu'au  $t=36000\text{s}$ .

Aucune charge n'a été branché aux bornes des batteries entre les instants  $t=0\text{s}$  et  $t=24000\text{s}$ . De  $t=24000\text{s}$  jusqu'au  $t=30000\text{s}$ , on a appliqué une charge d'une puissance  $750\text{W}$  puis de l'instant de  $t=30000\text{s}$  jusqu'au  $t=36000\text{s}$  on a augmenté la charge à une puissance de  $1500\text{W}$ .

Les figures (IV.7, 8, 9,10) représentent respectivement le SOC, la tension des batteries, courant de charge et courant de décharge des batteries. Sachant que le courant de charge et

égale au courant fournit par le générateur photovoltaïque et le courant de décharge est celui demandé par la charge.

Les résultats de simulation obtenus entre  $t=0s$  et  $t=24000s$ , montrent que l'augmentation de l'éclairement engendre l'augmentation du SOC, du courant de charge et de la tension aux bornes de la batterie. Le courant de décharge est nulle étant donné aucune charge n'a été connecté. Ceux obtenus a partir de  $t=24000s$ , montrent que l'introduction puis l'augmentation de la charge engendre l'augmentation du courant de décharge. Par contre le courant de charge reste constant, étant donnée l'éclairement est gardé constant. La supériorité du courant de décharge par rapport au courant de charge, engendre une diminution du SOC et de la tension aux bornes des batteries.

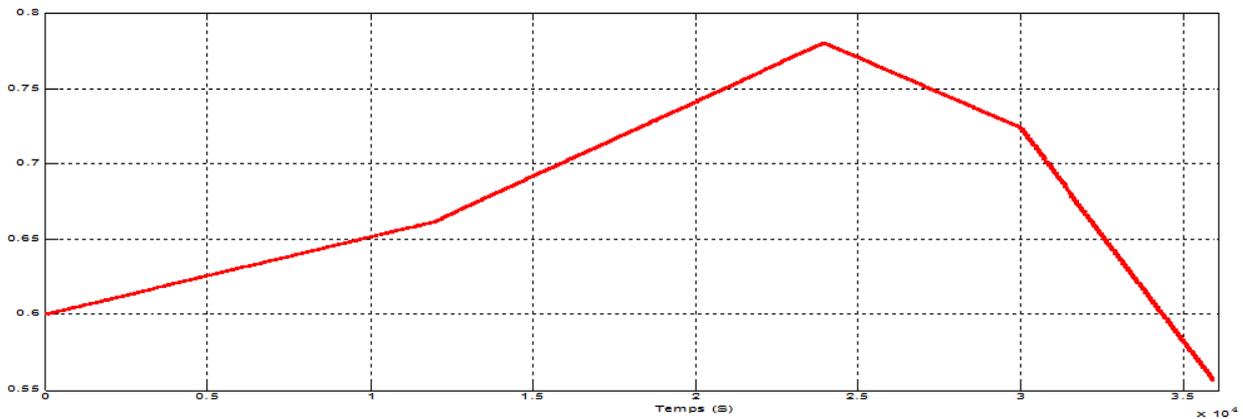


Figure (IV.7) : SOC des batteries

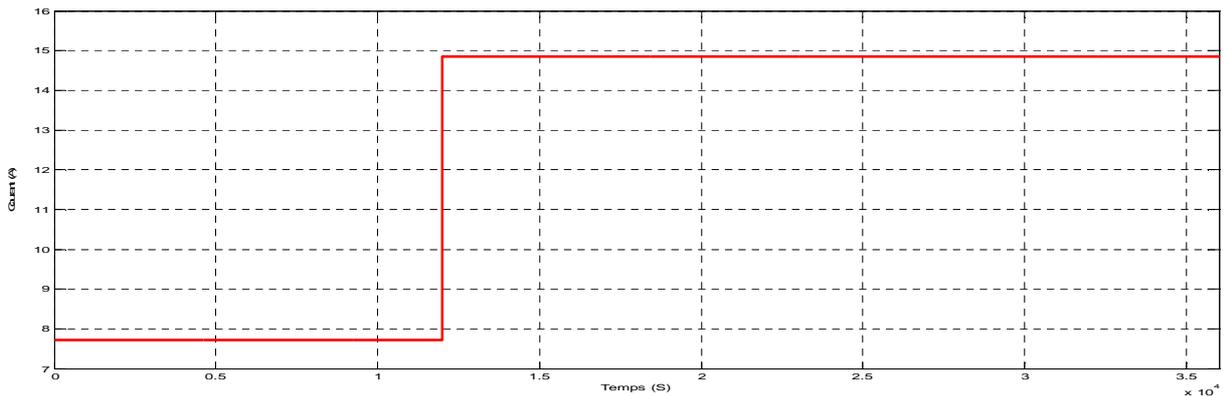


Figure (IV.8) : courant de charge des batteries

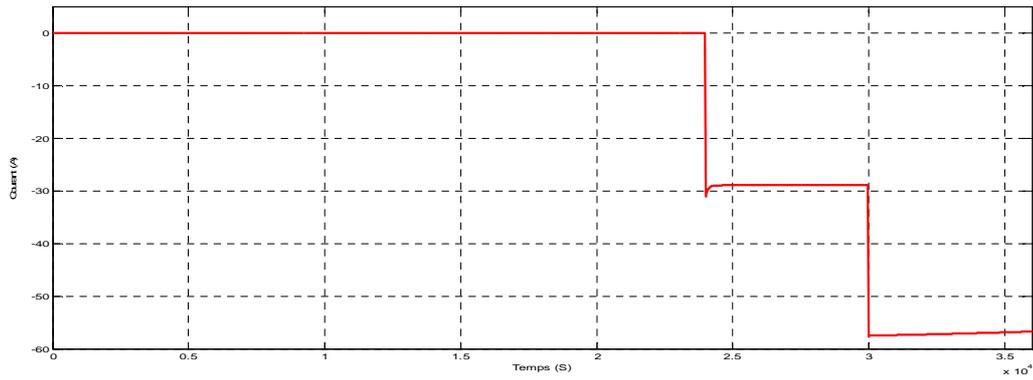


Figure (IV.9) : courant de décharge des batteries

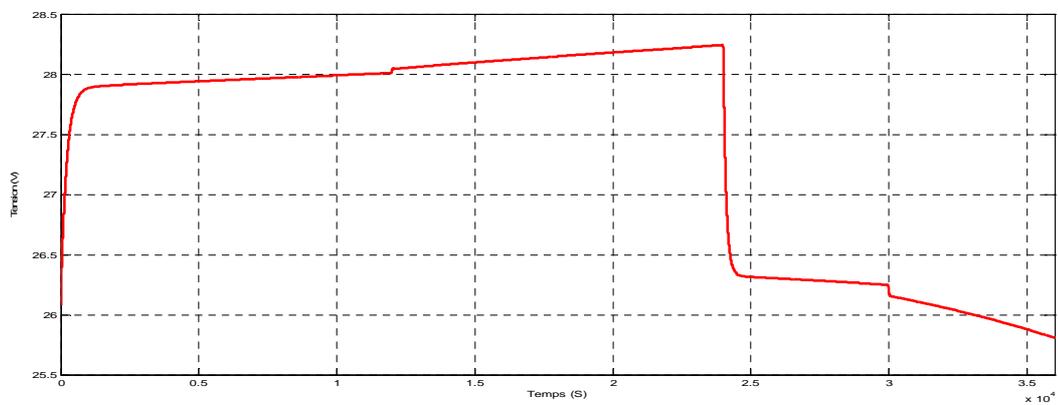


Figure (IV.10) : Tension au bornes des la batterie

### VI.3.2. Simulation de la chaîne hybride (éolien, batterie chargée par l'énergie photovoltaïque)

Le schéma bloc du système éolienne-batteries alimentant une charge étudié est représenté sur la figure (IV.11). Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink sont représentés si dessous :

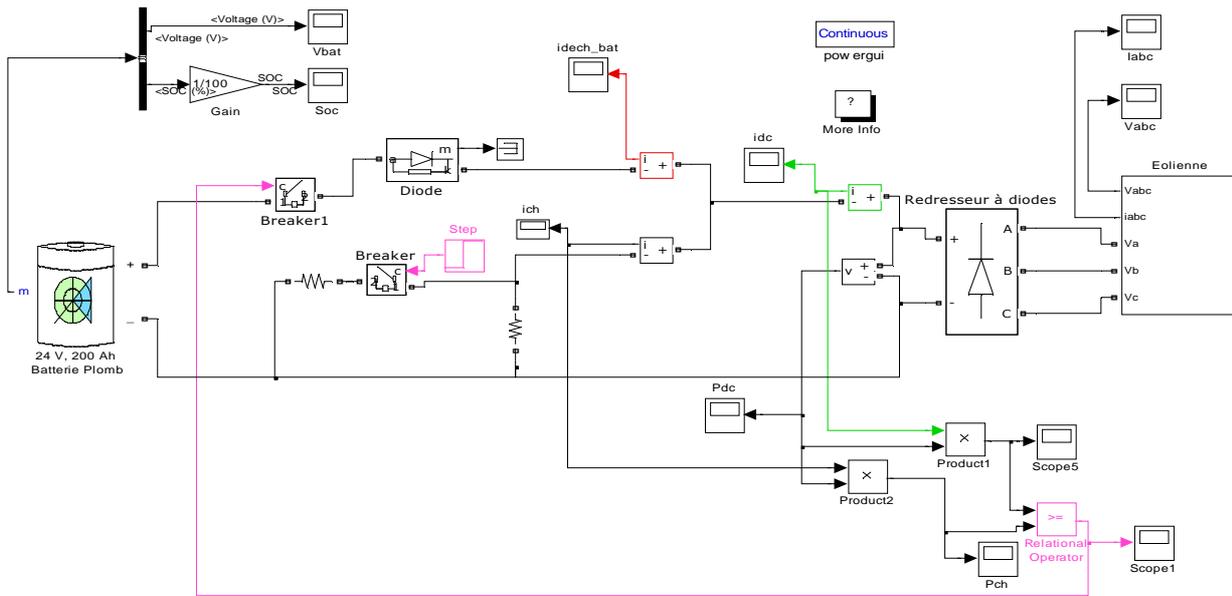


Figure (IV.11) : Schéma bloc de la chaîne hybride.

Pour montrer le fonctionnement du système hybride étudié, on a appliqué des échelons variables de la vitesse et de la charge.

On a simulé le système étudié à un temps de 40s. On a appliqué une vitesse, de 18,48 rad/s et une charge constante, de  $t=0s$  jusqu'au  $t=10s$ , puis une augmentation de 100% de la charge entre  $t=10s$  à  $t=20s$  en gardant la même vitesse de rotation. A partir de  $t=20s$ , on a diminué la vitesse à 14.78 rad/s, pour une charge constante.

Les figures (IV.12, 13, 14, 15, 18, 19) représentent respectivement la tension redressée, le courant redressé, le courant de la charge, le courant de décharge de la batterie, la puissance électrique à la sortie du redresseur à diode, la puissance consommée par la charge, le SOC et la tension aux bornes des batteries.

Les résultats de simulation obtenus entre  $t=0s$  et  $t=10s$ , le soc et la tension aux bornes des batteries restent constants, le courant de décharge est nul étant donné la puissance fournie par est supérieur à celle demandé par la charge. Dans ce cas la charge est alimentée uniquement par l'éolienne.

L'augmentation de la charge entre les instants  $t=10s$  et  $t=20s$  engendre l'augmentation de la puissance demandée par la charge. Dans ce cas le manque de puissance est fourni par les batteries ce qui engendre la diminution du SOC et la tension aux bornes des batteries.

Ceux obtenus à partir de  $t=20s$ , montrent que la diminution de la vitesse engendre la diminution de la puissance fournie par l'éolienne et l'augmentation de la puissance fournie par les batteries (courant de décharge augmente).

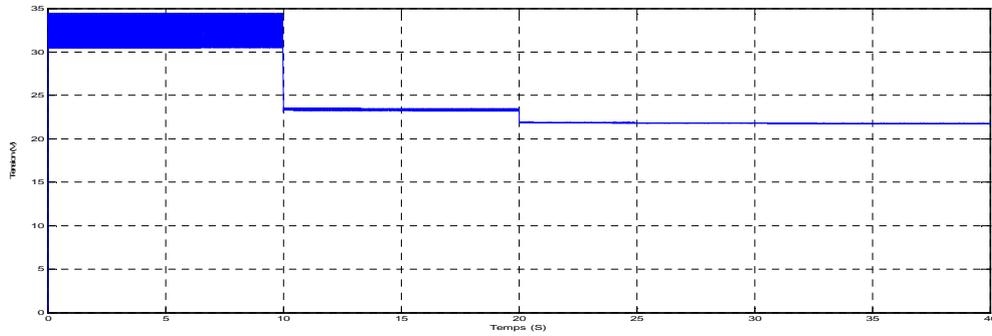


Figure (IV.12) : Tension redressée ( $V_{dc}$ )

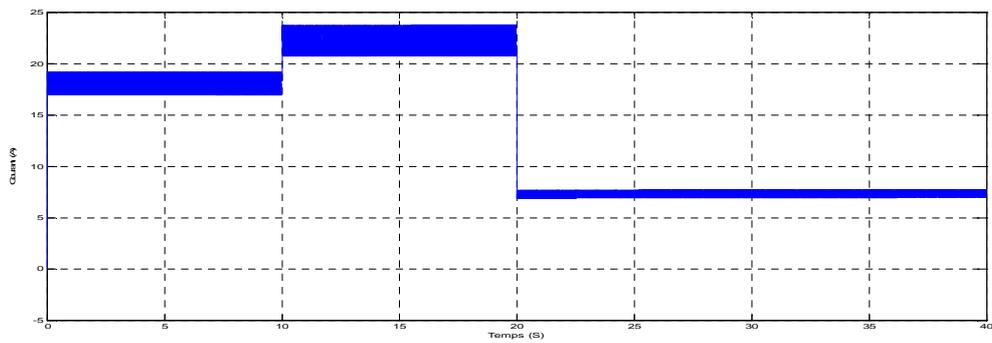


Figure (IV.13) : Courant redressée ( $I_{dc}$ )

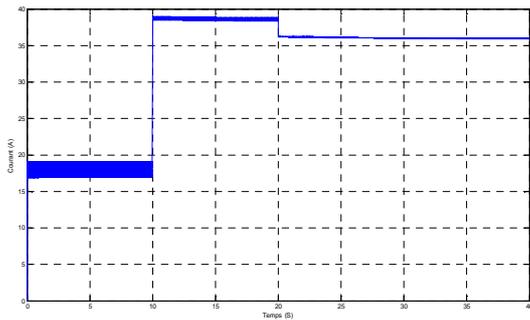


Figure (IV.14) : Courant de la charge ( $I_{ch}$ )

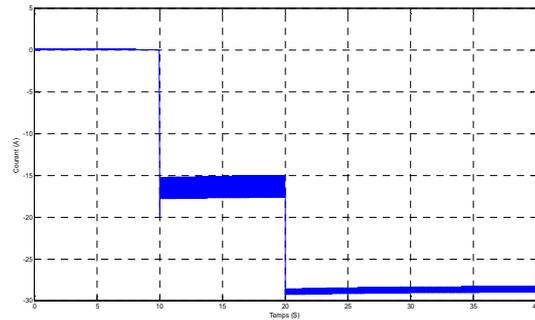


Figure (IV.15) : Courant de décharge de batterie ( $I_{dech}$ )

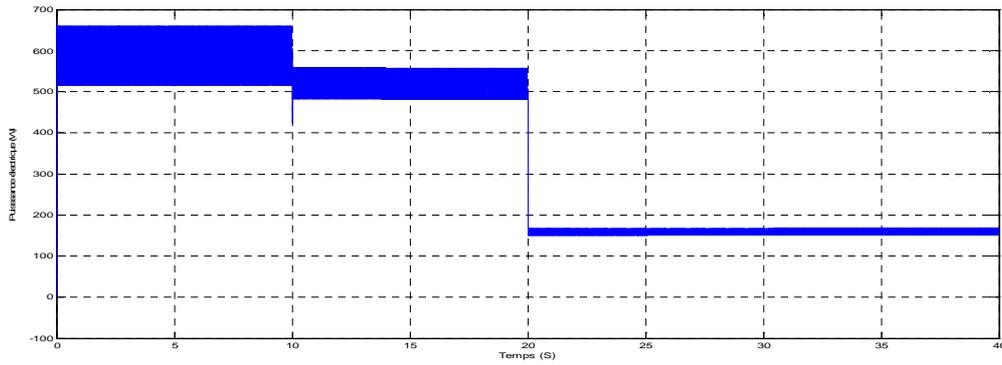


Figure (IV.16) : Puissance électrique ( $P_{dc}$ )

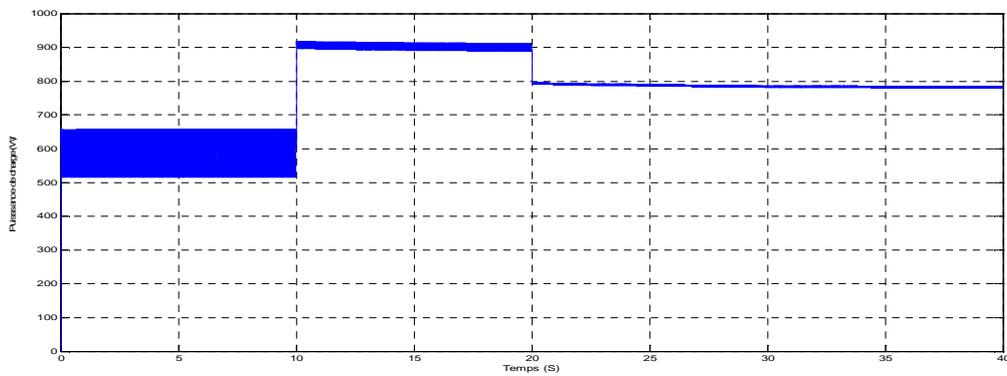


Figure (IV.17) : Puissance de la charge ( $P_{ch}$ )

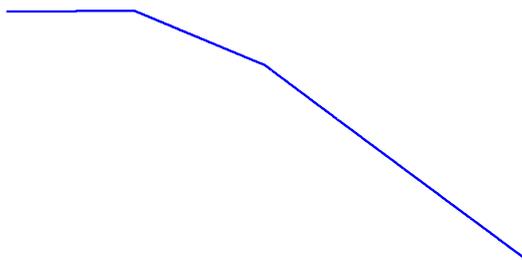


Figure (IV.18) : SOC des Batteries

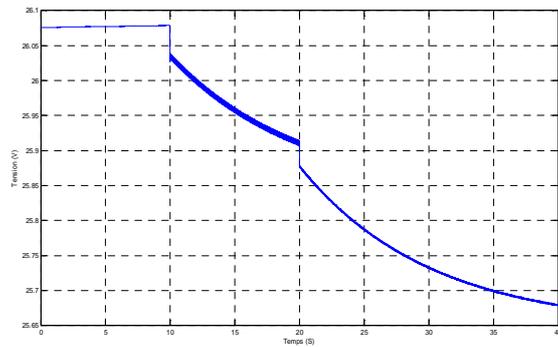


Figure (IV.19) : Tension des batteries ( $V_{bat}$ )

#### IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté divers modèles des batteries. Puis on a présenté le système hybride (photovoltaïque-éolien) à étudié, selon la manière dont les deux systèmes sont connectés avec la charge et le système de stockage (batteries). Enfin, nous avons simulés le système hybride sur Matlab /Simulink pour étudier son fonctionnement.

# Conclusion Générale

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail, l'étude et la simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique.

La première partie de ce mémoire est consacré à la présentation d'un état de l'art sur les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, notamment les énergies photovoltaïque et éolienne. Puis on a présenté quelque combinaison des systèmes hybrides.

Un système photovoltaïque est étudié dans le deuxième chapitre. Il a pour objectifs, la modélisation et l'identification de la chaîne de conversion photovoltaïque. Une identification d'un panneau photovoltaïque a été réalisée expérimentalement, et les résultats obtenus ont été comparé à ceux obtenus par simulation, afin de valider le modèle adopté pour modéliser les panneaux photovoltaïques. Ces résultats montrent une bonne concordance entres eux.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et la simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne. Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent et le bon fonctionnement du système globale.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté le système hybride (photovoltaïque-éolien) en fonctionnement autonome avec stockage (batteries). Plusieurs tests de variation des paramètres (ensoleillement, la vitesse d'entraînement de la génératrice et la charge) influents sur le fonctionnement du système globale ont été faites. Les résultats obtenus montrent le bon comportement du système hybride étudié.

Comme perspectives, il est intéressant de remplacer le redresseur non commandé par un autre commandé et d'introduire des algorithmes de détection du point de puissance maximale (MPPT) afin d'optimiser le fonctionnement du système globale et de mieux gérer son énergie.

# Références Bibliographiques

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. BELAKEHAL « Conception & Commande des Machines à Aimants permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse doctorat, Université de Constantine, juin 2010.
- [2] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [3] S.Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride ( photovoltaïque eolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat à l'université de Bejaia, 2009
- [4] <http://www.in-terre-actif.com/> consulté en avril 2012.
- [5] <http://www.energies-renouvelables.org> consulté en avril 2012.
- [6] [www.neal-dz.net](http://www.neal-dz.net) consulté en avril 2012.
- [7] <http://www.mem-algeria.org/> consulté en avril 2012.
- [8] M. Nikoz, H. Dehbonei, C. Naher ( A DSP- Controlled photovoltaic system with MPPT) Revue electric all energy and information technology ITEE, Australia 2003. pp: 1-6.
- [9] Z. Bendjellouli, «Contribution a la modélisation d'une cellule solaire», mémoire de Magistère, UNIVERSITE DE BECHAR. 2009
- [10] A.K. Ould Mahmoud « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour alimentation de charges mixtes »,Thèse doctorat, Université de Dakar.
- [11] F. Poitiers «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse doctorat de l'université de Nantes, France, 2003.
- [12] O. Gergaud « Modélisation énergétique et économique d'un Système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ». Ecole Supérieure de Cachan, France, 2002
- [13] K. Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrice Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes » Thèse en cotutelle entre l'université A. Mira de Bejaia (Algérie) et l'université Lille 1 (France)

Mai 2010.

- [14] L. Zarour « étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseaux » Thèse , Université de Constantine 2010.
- [15] M. LOPEZ «Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » thèse Université paris sud11, 2008.
- [16] A.Sadek « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », mémoire de Magistère, Université de Batna, 01/07/2009.
- [17] D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel ».Revue des énergies renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 623-633 à Université A. Mira, Bejaia.
- [18] F. Baghdadi « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergie renouvelable »mémoire de magistère université Tizi Ouzou, 2011.
- [19] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga « Etude comparative des modèles de la des Energies Renouvelables ICRES-07 » ,Tlemcen ,2007
- [20] M. Djarallah « Contribution a l'étude des Systems photovoltaïque résidentiels couples au réseau électrique » , Thèse de doctorat en sciences à l'université de Batna 2008.
- [21] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 2007.
- [22] Ben Smail. S « Contribution à la modélisation et à l'optimisation du système Photovoltaïque », mémoire de magister en électrotechnique, université A.Mira de Bejaia, 2012
- [23] S.Lalouni « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un changeur de batteries », Mémoire magister université de Bejaia, 2005 .

## **Résumé**

*Avec la crise pétrolière annoncée depuis quelques années déjà, le recours aux énergies renouvelables connaît une forte expansion ; parmi elles, l'énergie photovoltaïque et éolienne, se sont des technologies prometteuses en termes de sécurité d'approvisionnement et de préservation de l'environnement. Néanmoins, elle présente deux principaux inconvénients : la production d'énergie n'est pas continue et dépend des conditions météorologiques.*

*A travers notre travail, nous avons étudié un système hybride qui est constituée de deux chaînes de conversion d'énergies « photovoltaïque, éolienne », autonome avec stockage électrochimique « batteries », permettant de réduire les contraintes citées plus haut. D'une part une identification d'un des panneaux photovoltaïque de notre installation. Ainsi la simulation des deux chaînes avec des différentes conditions de fonctionnement. Enfin, une gestion globale efficace.*