

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : Ilhem BELDJERBA

Amira SEFSAF
Thème

**Simulation et modélisation des aérogénérateurs et
cellules photovoltaïques associés à un convertisseur
(dévolteur-survolteur)**

Soutenu publiquement, le 28/09/2020 , devant le jury composé de :

Dr. Mohammed MABROUKI	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
Dr. Laarej MERAD	MCA	Univ-Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr. Mama BOUCHAOUR	MCB	Univ-Tlemcen	Co-Directrice de mémoire
Dr. Imen BOUSMAHA	MCB	ESSA.Tlemcen	Examineur 1
Dr. Abd El Karim CHEMIDI	MCB	Univ-Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices. Nos remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. Laarej MERAD, maitre de conférences (A) à l'université de Tlemcen, pour ses conseils, sa disposition et son encadrement.

Nos remerciements vont aussi à notre Co-encadreur Dr. Mama BOUCHAOUR, maitre de conférences (B) à l'université de Tlemcen, pour son soutien et ces conseils.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce modeste mémoire et de l'enrichir par leurs critiques constructives.

- ❖ Monsieur Mohammed MABROUKI, Maitre de Conférence (A) à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT), de nous faire l'honneur de présider le jury.
- ❖ Madame Imen BOUSMAHA, Maitre de Conférence (B) à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT), d'accepter de juger notre travail.
- ❖ Monsieur Abd El Karim CHEMIDI, Maitre de Conférence (B) à l'université de Tlemcen, d'accepter d'évaluer notre travail.

On remercie nos familles pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amies. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements sans oublier toute personne ayant apporté un plus à l'élaboration du présent travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à

A mes parents, à ma précieuse maman ZOËRA qui grâce à elle je suis arrivée là où j'en suis aujourd'hui, à mon cher papa HOUARI que Dieu vous préserve et vous garde la santé

A mes sœurs SOUMIA, FAIZA et CHAHINEZ

A mon fiancé IMAD qui m'a toujours encouragé

A mes chères amies LYDIA, CHAIMAA et FATIMA

A ma copine et mon binôme AMIRA ainsi que toute sa famille

A toute personne qui m'est chère au cœur.

ILHEM

Dédicace

*Du profond de mon cœur, Je dédie ce travail à ceux qui me
sont chers,*

A ma très chère mère

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te
remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta
bienveillance me guide et ta présence à mes cotés a toujours
été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

A ma grand-mère

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me
portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction
m'accompagne toujours.*

*A mes sœurs Faïza et Khansaà, qui m'avaient toujours
soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*A toute personne ayant contribué de près ou de loin à
l'avancement de ce travail*

*A mon cher binôme "Ilhem" et toute sa famille, un
remerciement spécial.*

A tous ceux que j'aime

Merci

Amira

Liste de symboles :

PV : photovoltaïque

GPV : générateur photovoltaïque

PPM : point de puissance maximale

MAS : Machine asynchrone

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

MS : Machine synchrone

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent

DC : direct current (courant continu)

MPPT : Point de poursuite de puissance maximale

CO₂ : Dioxyde de carbone

PWM : Pulse Width modulation (modulation de largeur d'impulsion)

I : courant [A]

V : tension [V]

E_g : L'énergie de gap de semi-conducteur

E_c : L'énergie de la bande de conduction

E_v : L'énergie de la bande de valence

V_{oc} : Tension de circuit ouvert [V]

I_{cc} : Courant de court-circuit [A]

R : Résistance [Ω]

L : Inductance [H]

C : Condensateur [F]

α : Rapport cyclique

T : Période

f : fréquence [Hz]

v_e : Tension d'entrée

v_s : Tension de sortie

K : Interrupteur

I_{Lmin} : Courant minimale dans l'inductance

I_{Lmax} : Courant maximale dans l'inductance

V_L : Tension de l'inductance

i_L : Courant dans l'inductance

I_d : Courant de diode

Δi_L : L'ondulation de courant dans l'inductance

ΔV_s : L'ondulation de la tension de sortie

R_{sh} : Résistance shunt

R_s : Résistance série

I_{ph} : Courant de photon

I_{cell} : Courant de la cellule

I_{sat} : Courant de saturation

V_{cell} : Tension de la cellule

G : Eclairement [W/m^2]

P_{max} : Puissance maximale [W]

P_v : Puissance du vent [W]

C_p : Coefficient de puissance

C_p^{opt} : Coefficient de puissance optimale

λ : La vitesse spécifique

β : Angle d'orientation des pales [degré]

Φ_s : Flux statoriques

m_s : Inductance mutuelle

L_s : Inductance propre d'une phase

d : Enroulement direct

q : Enroulement quadratique

V_{abc}, V_{dq} : Tensions statoriques de la MSAP dans le repère réel et de Park respectivement

φ_f : Le flux traversant l'enroulement inducteur

T_e : Couple électromagnétique

$P(t)$: Puissance instantanée mise en jeux par le moteur

L_d : Inductance statoriques directe [H]

L_q : Inductance statoriques quadrature [H]

$P(\theta)$: Matrice de la transformation de Park

$[P(\theta)]^{-1}$: Matrice inverse de Park

$[M_{sf}]$: La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator

e_d, e_q : composants de la force électromotrice de compensation

V_m : tension moyenne

V_1, V_2, V_3 : tensions d'entrée entre phases du redresseur [V]

Listes des figures :

<i>Figure (I.1) : Système photovoltaïque</i>	5
<i>Figure (I.2) : Effet photovoltaïques</i>	6
<i>Figure (I.3) : Diagrammes de bande d'énergie au voisinage de la jonction</i>	7
<i>Figure (I.4) : Coupe transversale d'une cellule PV typique</i>	8
<i>Figure (I.5) : Cellule photovoltaïques en silicium monocristallin</i>	9
<i>Figure (I.6) : Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin</i>	9
<i>Figure (I.7) : Cellule photovoltaïque en silicium amorphe</i>	10
<i>Figure (I.8) : Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série</i>	11
<i>Figure (I.9) : Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle</i>	11
<i>Figure (I.10) : Installation photovoltaïque autonome</i>	12
<i>Figure (I.11) : Schéma d'une éolienne</i>	14
<i>Figure (I.12) : Différents types d'aérogénérateurs de type Darrieus</i>	16
<i>Figure (I.13) : Aérogénérateur de type Savonius</i>	17
<i>Figure (I.14) : Aérogénérateur à axe horizontal</i>	18
<i>Figure (I.15) : Conversion d'énergie dans un aérogénérateur</i>	20
<i>Figure (I.16) : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne</i>	21
<i>Figure (I.17) : MADA dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne</i>	21
<i>Figure (I.18) : Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants</i>	22
<i>Figure (I.19) : Machine synchrone dans une chaîne de conversion d'éolienne</i>	23
<i>Figure (II.1) : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques</i>	27
<i>Figure (II.2) : Symbole et signaux du convertisseur DC/DC</i>	27
<i>Figure (II.3) : Schéma de principe d'un hacheur dévolteur</i>	28

<i>Figure (II.4) : Formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseur Buck.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure (II.5) : Schéma de principe d'un hacheur survolteur.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure (II.6) : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure (II.7) : Schéma de base d'un convertisseur Buck-boost.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure (II.8) : Formes d'ondes de courant et de tension de convertisseur.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure (II.9) : Chaîne de conversion d'énergie solaire.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure (II.10) : Organigramme de la commande MPPT P&O.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure (II.11) : Organigramme de la méthode de conductance incrémentielle.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure (III.1) : Schématisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec MPPT.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure (III.2) : Composants d'un générateur photovoltaïque.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure (III.3) : Schéma équivalent d'une cellule PV.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure (III.4) : Modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure (III.5) : Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure (III.6) : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure (III.7) : Influence de la température sur la caractéristique I-V.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure (III.8) : Influence de la température sur la caractéristique P-V.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure (III.9) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I-V.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure (III.10) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P-V.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure (III.11) : Schéma bloc du convertisseur Buck-Boost.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure (III.12) : Forme d'onde de courant et de tension à la sortie lorsque le convertisseur est abaisseur.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure (III.13) : Forme d'onde de courant et de tension à la sortie lorsque le convertisseur est élévateur.....</i>	<i>54</i>

<i>Figure (III.14) : Schéma bloc de la commande MPPT P&O</i>	<i>55</i>
<i>Figure (III.15) : Chaîne de conversion photovoltaïque (PV+ convertisseur DC-DC + charge).....</i>	<i>55</i>
<i>Figure (III.16) : Résultats de simulation de tension à la sortie de la charge pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure (III.17) : Résultats de simulation de courant à la sortie de la charge pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure (III.18) : la puissance de sortie de la charge pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure (III.19) : la puissance de sortie du panneau pour $G=1000 \text{ W/ m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure (III.20) : La puissance de la sortie de la charge et du panneau pour différentes valeurs d'éclairement.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure (III.21) : La puissance de la sortie de la charge et du panneau pour différentes valeurs de température.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure (III.22) : Eléments de la chaîne éolienne</i>	<i>59</i>
<i>Figure (III.23) : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure (III.24) : Turbine connecté au modèle de multiplicateur de vitesse et au modèle de l'arbre..</i>	<i>63</i>
<i>Figure (III.25) : Schéma de la MSAP dans le repère (a, b, c).....</i>	<i>64</i>
<i>Figure (III.26) : Schéma de la MSAP dans le repère (d q).....</i>	<i>66</i>
<i>Figure (III.27) : Représentation d'un redresseur triphasé à diode double alternance.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure (III.28) : Modèle du système éolien sous Matlab.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure (III.29) : Vitesse de vent et angle de calage.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure (III.30) : Tensions générés V_{abc}.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure (III.31) : Courants statoriques I_{abc}.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure (III.32) : Tension redressé U_{dc}.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure (III.33) : Chaîne de conversion éolienne.....</i>	<i>73</i>

Figure (III.34) : Résultats de simulations du courant à la sortie de la charge pour une vitesse de vent 12 m/s.....73

Figure (III.35) : Résultats di simulation de la tension à la sortie de la charge pour une vitesse de vent 12 m/s.....74

Figure (III.36) : Résultats de simulations de la puissance à la sortie de la charge pour une vitesse de vent 12 m/s.....74

Liste des tableaux :

Tableau (I.1) : Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.....19

Sommaire

Introduction générale :	1
Chapitre I	4
Généralités sur les aérogénérateurs et les cellules photovoltaïques	4
I.1.INTRODUCTION	4
I.2. Energie solaire	4
I.2.1. Energie solaire photovoltaïques	4
I.3. Electricité solaire par effet photovoltaïque	5
I.3.1. Principe de fonctionnement	5
I.4. Cellules photovoltaïques	7
I.4.1. Fonctionnement des cellules photovoltaïques	8
I.4.2. Différents types des cellules photovoltaïques	8
I.4.2.1. Cellules photovoltaïques en silicium monocristallin	8
I.4.2.2. Cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin	9
I.4.2.3. Cellule au silicium amorphe.....	9
I.5. Module (panneau)	10
I.6. Générateur photovoltaïque	11
I.7. Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque	12
I.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	12
I.8.1. Avantages.....	12
I.8.2. Inconvénients	13
I.9. ENERGIE EOLIENNE	13
I.9.1. Fonctionnement d'une éolienne	13
I.10. Composants d'aérogénérateur	14
I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	15
I.11.1. Avantages :.....	15
I.11.2. Inconvénients	15
I.12. Types d'aérogénérateurs	15
I.12.1. Aérogénérateur à axe vertical	15
I.12.1.1 Aérogénérateur verticale type Darrieus.....	16
I.12.1.2. Aérogénérateurs domestiques type Savonius	16
I.12.1.3. Eolienne à voile tournante	17
I.12.2. Aérogénérateur à axe horizontal	17

I.13. Classification des aérogénérateurs selon leur vitesse	18
I.13.1. Eoliennes à vitesse fixe	18
I.13.2. Eolienne à vitesse variable	19
I.14. Principe de conversion de l'énergie éolienne	19
I.15. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique	20
I.15.1. Système utilisant les générateurs Asynchrone	20
I.15.2. Système utilisant les générateurs Synchrones	22
I.16. Conclusion :	23
Chapitre II :	26
Les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT	26
II.1. Introduction	26
II.2. CONVERTISSEURS STATIQUES	26
II.2.1. Définition	26
II.2.2. Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques	27
II.3. Types des convertisseurs de tension DC/DC (hacheur)	27
II.3.1. Hacheur dévolteur (Buck)	28
II.3.1.1. Fonctionnement	28
II.3.2. Hacheur survolteur (Boost)	30
II.3.2.1. Fonctionnement	30
II.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	32
II.4. Principe de fonctionnement de la commande MPPT	34
II.5. Classification des commandes MPPT	34
II.5.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée	34
II.5.1.1. Commande MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur	34
II.5.1.2. Commande MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :	35
II.5.2. Classifications des commandes MPPT selon le type de recherche	35
II.5.2.1. MPPT indirect	35
II.5.2.2. MPPT direct	35
II.6. Algorithmes MPPT	36
II.7. Méthodes de recherche MPPT	36
II.7.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O)	36
II.7.2. Méthode de conductance incrémentale	38
II.8. Technique de la commande PWM :	39

II.8.1. Principe de la commande PWM	39
II.9. Conclusion :	39
Chapitre 3 :	43
Modélisation et simulation d'un aérogénérateur et d'un système photovoltaïque	43
III.1.Introduction :	43
III.2.Structure de la chaine de conversion photovoltaïque :	43
III.2.1.Modélisation du générateur photovoltaïque :	44
III.2.1.1.Modèle sous Matlab/Simulink :	48
III.2.1.2.Caractéristique I(V) et P(V) :	48
III.2.1.3. Influence de la température sur les courbes I-V et P-V :	49
III.2.1.4. Influence de l'irradiation sur les courbes I-V et P-V :	51
III.2.2. Modèle d'un hacheur Buck-Boost :	52
III.2.3. Simulation de la méthode MPPT P&O :	54
III.3. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque :	55
III.3.1. Simulation de la chaine pour différentes valeurs d'éclairement et de température :	58
III.4. Structure de la chaine de conversion éolienne :	59
III.4.1. Modélisation du vent :	59
III.4.2. Modèle de la turbine :	60
III.4.3. Modèle du multiplicateur :	62
III.4.4. Modélisation de la génératrice :	63
III.4.4.1. Hypothèses simplificatrices :	63
III.4.4.2. Mise en équations électriques et magnétiques dans repère (a b c) :	64
III.4.4.3. Mise en équations électriques et magnétiques dans le repère de Park :	66
III.4.5. Modèle du redresseur à diode :	69
III.5. Modèle d'une éolienne sous Matlab :	70
III.5.1. Vitesse de vent :	70
III.5.2. Tensions et courants générés :	71
III.6. Simulation de la chaine de conversion éolienne :	73
III.7. Conclusion :	75
CONCLUSION GENERALE	77

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours [1]. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles (pétrole, charbon et gaz). La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables se produisent de manière continue, et sont inépuisables, à une échelle humaine. De ces énergies émergent trois grandes familles : les énergies renouvelables d'origine mécanique (éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...).

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée. Il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. [1]

D'un autre côté, l'énergie éolienne transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisée sur place (site isolé de réseau de distribution) [1].

Ces énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche. Le but majeur est de développer des techniques d'extraction de puissance visant à fiabiliser, baisser les couts (de fabrication, d'usage et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique [2].

L'Etat Algérien suit de près ces études et essaie de développer le secteur des énergies renouvelables. En effet, le soleil et l'énergie éolienne représentent un potentiel important dans notre pays précisément à la région sud. Adrar en est un exemple réel. Ces ressources devraient lui donner une autre extension pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelable dans les décennies à venir.

C'est dans ce contexte que cette étude s'insère. C'est une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergies renouvelables.

Le présent mémoire intitulé « Modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un aérogénérateur et système photovoltaïque adapté à un convertisseur dévolteur-survolteur » comporte trois chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens et photovoltaïques c'est-à-dire les notions de base sur le principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque et éolienne.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisé dans le système étudié. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte. Aussi, on présente la commande MPPT.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et la simulation des deux systèmes photovoltaïques et éoliens pour l'alimentation d'une charge en utilisant des méthodes de la commande MPPT pour extraire un maximum de puissance.

Notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Référence :

[1] : H.SALLAHI, L.ZEBIRI, « Expérimentation d'un système hybride (Photovoltaïque-éolien) destiné pour la production d'électricité et l'alimentation d'une maison dans la région d'Adrar », mémoire de master, université d'Adrar, (2014).

[2] : S.FERGANE, « Commande MPPT d'un aérogénérateur basée sur des observateurs neuro-floue», mémoire de master, université de Bejaia, (2013).

Chapitre I

Généralités sur les aérogénérateurs et les cellules photovoltaïques

I.1.INTRODUCTION

Les énergies renouvelables font partie intégrante de notre paysage. Leur potentiel est illimité, car elles utilisent les ressources naturelles de la terre sans entraîner la moindre pollution.

Ces énergies peuvent être converties, selon les besoins en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse, de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire.

L'énergie électrique provenant en particulier du vent et du soleil, est considérée comme une alternative de production importante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui.

En effet, les systèmes éoliens et photovoltaïques ont connu un grand essor ces derniers temps et sont devenus de plus en plus accessibles en termes de technologie et de coût. Une fois installés, ces systèmes ne dépendent d'aucune source ou réseau et présentent l'avantage de se trouver à proximité des sites de consommation.

Ce premier chapitre, présente une description générale sur l'énergie éolienne et l'énergie solaire et leur principe de fonctionnement.

I.2. Energie solaire

Le soleil se trouve à la base de toutes les énergies. Il produit de la chaleur et de la lumière. L'énergie solaire est l'énergie la plus abondante sur terre surtout en Algérie. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire de l'électricité à l'aide des semi-conducteurs photovoltaïques.

I.2.1. Energie solaire photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) (Voir figure I.1) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués de matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible réalisent cette transformation d'énergie [1].

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque(GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [1].

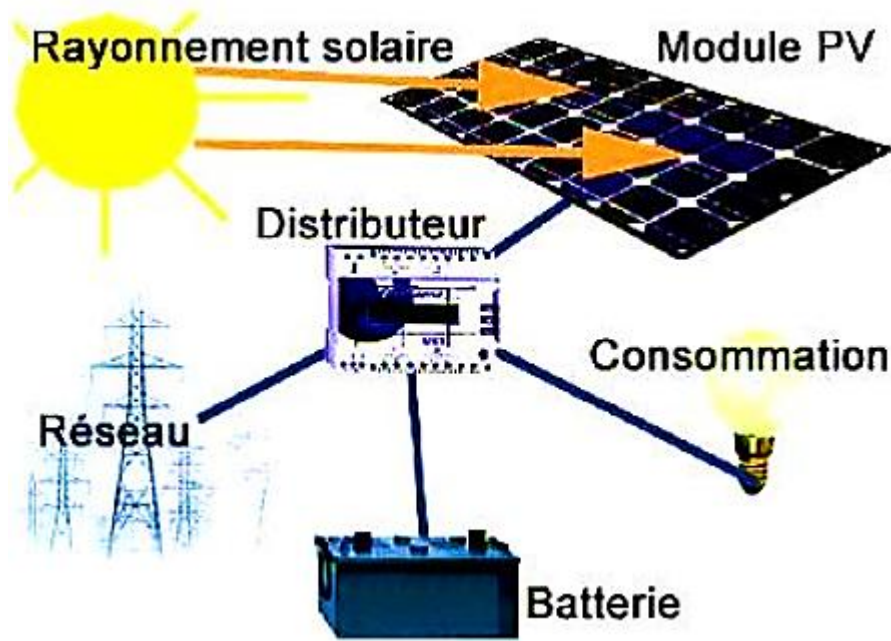


Figure (I.1) : Système photovoltaïque [1].

I.3. Electricité solaire par effet photovoltaïque

I.3.1. Principe de fonctionnement

Découvert par le physicien français A. BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque (Voir figure I.2) permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives (sous l'effet de la lumière) [2].

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc, entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [2].

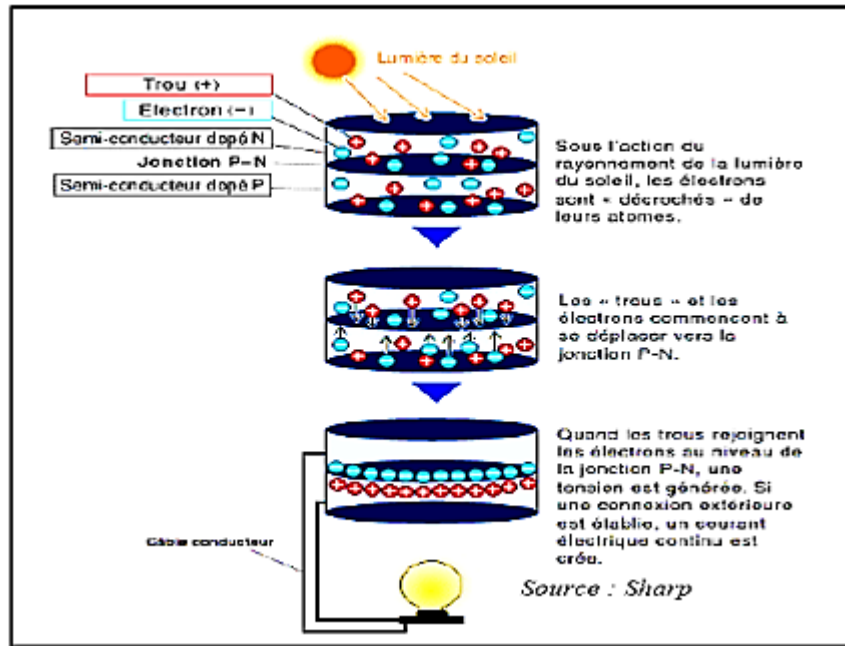


Figure (I.2) : Effet photovoltaïques [1].

Donc le principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$).

- Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_c - E_v$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition de paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires comme le montre la figure (I.3).
- Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.
- Si les photons ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leur énergie ne contribue pas à la conversion photovoltaïque [1].

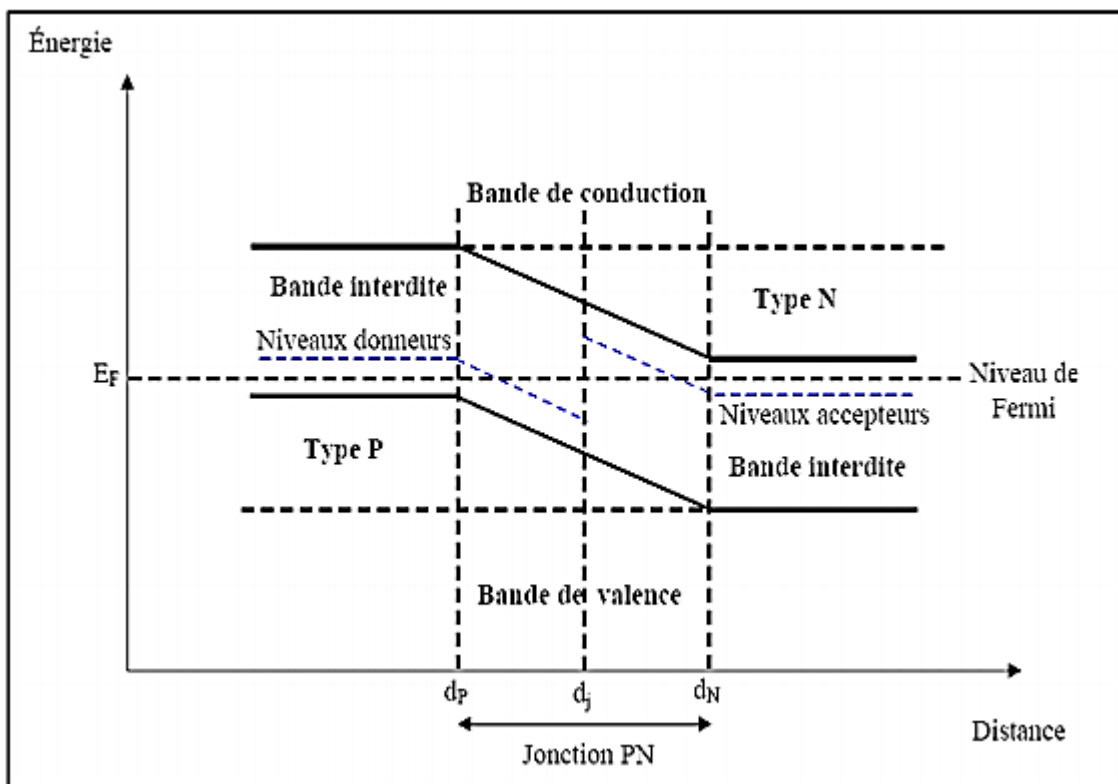


Figure (I.3) : Diagrammes de bande d'énergie au voisinage de la jonction [1].

I.4. Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité [3].

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension circuit ouvert (V_{oc}), voir figure (I.4). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [3].

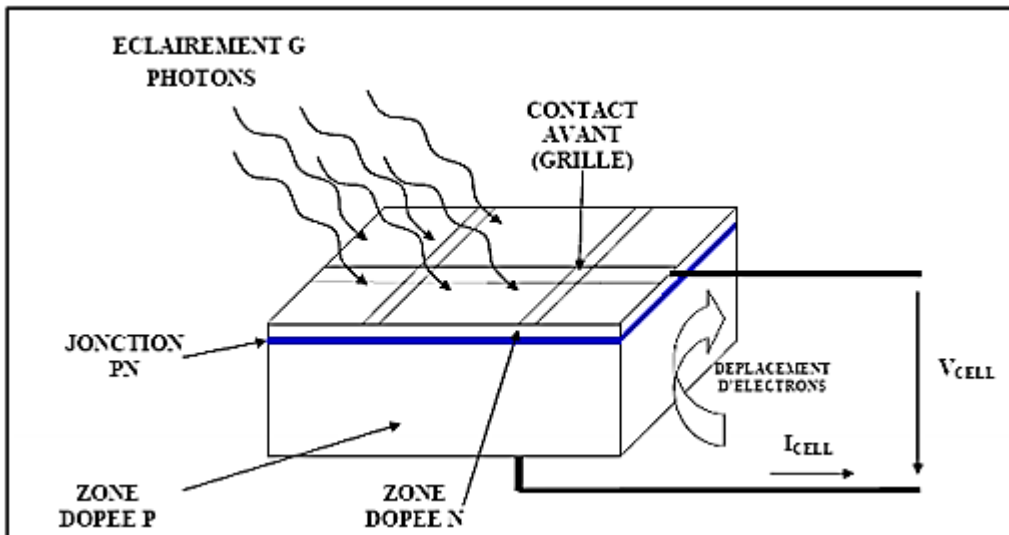


Figure (I.4) : Coupe transversale d'une cellule PV typique [1].

I.4.1. Fonctionnement des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite :

- L'absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- La collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de 0.5 V en circuit ouvert. L'intensité du courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et de la charge [1].

I.4.2. Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques chacune à un rendement différent :

I.4.2.1. Cellules photovoltaïques en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque (Voir figure I.5) est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer

des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou un réseau public par exemple [8].

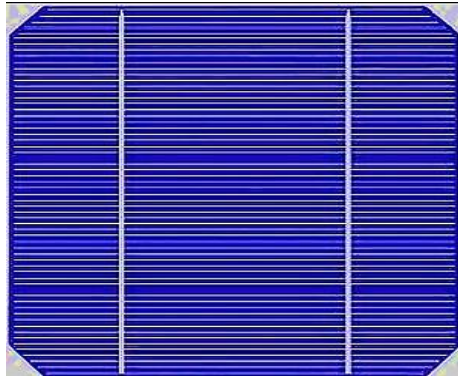


Figure (I.5) : Cellule photovoltaïques en Silicium monocristallin.

I.4.2.2. Cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles [8].

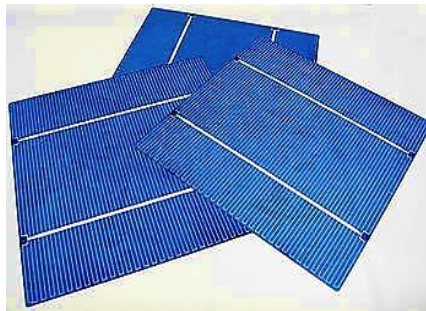


Figure (I.6) : Cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin.

I.4.2.3. Cellule au silicium amorphe

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe (Voir figure I.7) est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristalline. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires [8].

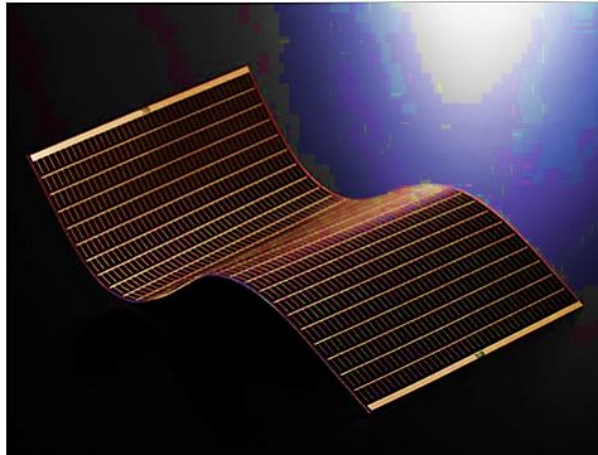


Figure (I.7) : Cellule photovoltaïque en silicium amorphe.

I.5. Module (panneau)

Typiquement une cellule photovoltaïque produit une petite puissance donc pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque [9].

Un module photovoltaïque est composé généralement de 36 cellules en série, protégé par un capsulage de verre et de plastique contre l'humidité. Cet ensemble est muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique [10]

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [9].

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [10].

❖ Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série (Voir figure I.8), le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

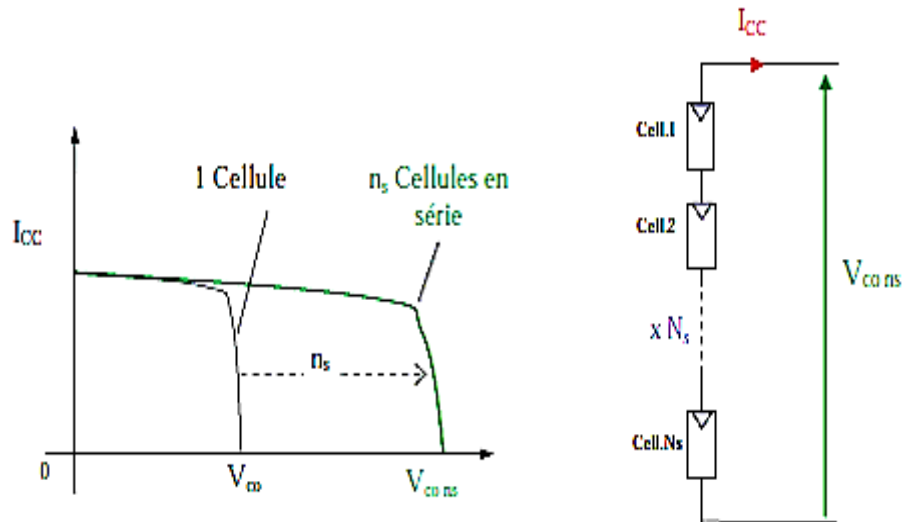


Figure (I.8) : Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série.[24]

❖ Association en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle (Voir figure I.9), la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

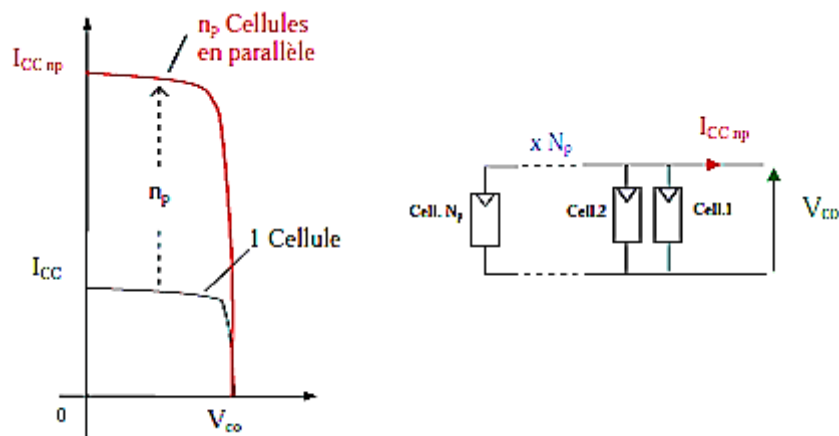


Figure (I.9) : Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.[24]

I.6. Générateur photovoltaïque

Le générateur PV représente la partie de production d'énergie électrique. Elle est composée d'un ou plusieurs modules PV. Ces modules sont formés d'un assemblage des cellules photovoltaïques. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant.

I.7. Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque

Dans le cas d'installation autonome (Voir figure I.10), l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 V alternatif [9].

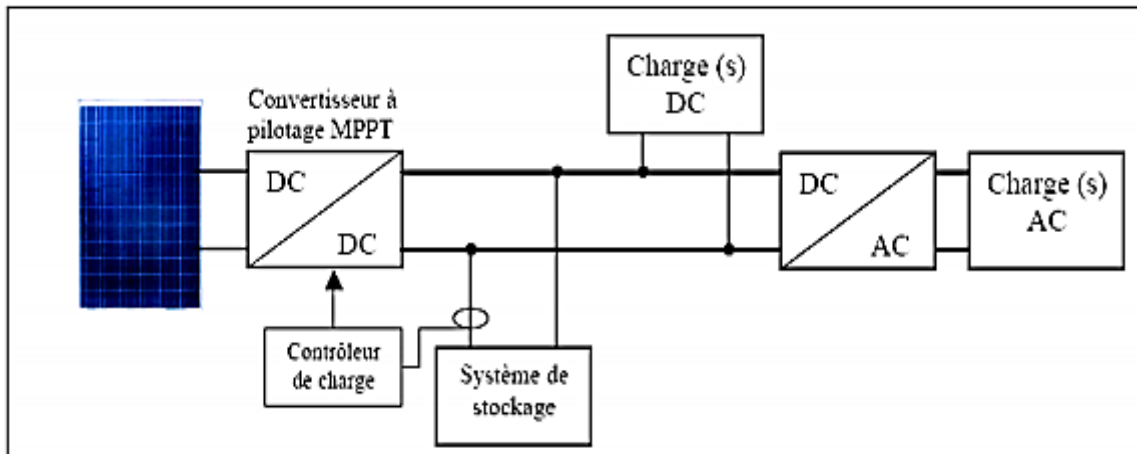


Figure (I.10) : Installation photovoltaïque autonome [9].

I.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

I.8.1. Avantages

- La haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux [11].
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du Milliwatt au Mégawatt [11].
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé [11].
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu [11].
- Le fonctionnement de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- La longue durée de vie.

I.8.2. Inconvénients

- 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 pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- La tributaire des conditions météorologiques.
- Le stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5 ans), ce qui entraîne un surcout au fonctionnement [12].

I.9. ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateur, grâce à la force du vent [4].

I.9.1. Fonctionnement d'une éolienne

L'éolienne ou bien l'aérogénérateur est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cela est fait par l'hélice qui entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission (cet arbre est couplé à un système d'engrenage qui joue le rôle d'une boîte de vitesse).

L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice entraînée par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

Pour des vents faibles, le système d'engrenage multiplie la vitesse de rotation de la turbine et pour un vent fort il freine la rotation pour garder une vitesse constante et éviter la destruction de l'éolienne.

I.10. Composants d'aérogénérateur

L'aérogénérateur est un dispositif composé de plusieurs éléments comme le montre la figure (I.11) :

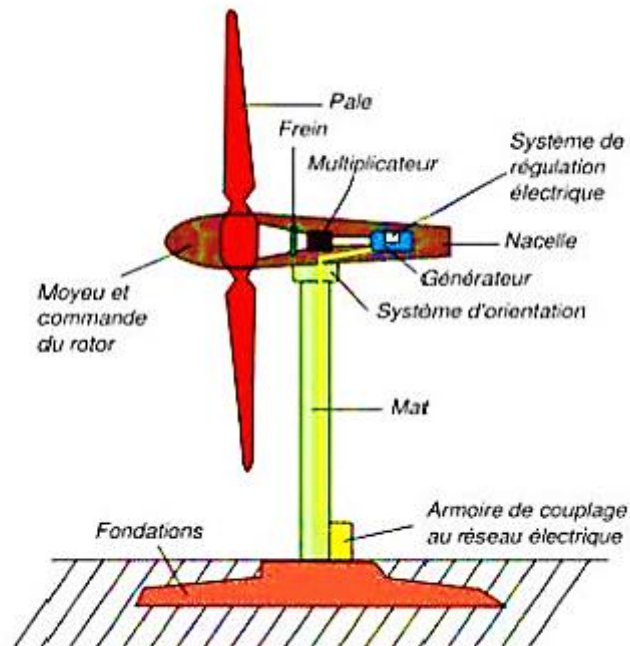


Figure (I.11) : schéma d'une éolienne [5].

- ❖ **Les fondations** : les fondations d'une éolienne sont en béton armé pour ancrer solidement l'éolienne dans le sol.
- ❖ **La nacelle** : contient quasiment tous les éléments d'une éolienne.
- ❖ **La tour** : elle doit être haute pour capter plus de vent et fait le plus souvent autour de 70 mètres elle doit supporter la nacelle et le rotor.
- ❖ **L'arbre principal** : il est directement entraîné par le rotor et fait un petit nombre de tours qui est considérablement agrandi par un multiplicateur.
- ❖ **Les pales** : les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyen du rotor.
- ❖ **Le mat** : permet de placer le rotor à une hauteur suffisante. Ainsi ce dernier pourra être équipé par une plus grande longueur de pale et être entraîné par un vent plus régulier et plus fort qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).
- ❖ **Le pivot d'orientation** : le pivot permet de faire tourner la nacelle pour l'orienter face au vent.

- ❖ **Le système de freinage** : les éoliennes ont les plus souvent trois pales car un nombre pair de pales entraîne un effet mécanique indésirable et de plus un nombre plus important entraîne un rendement moindre.
- ❖ **Multiplicateur** : il augmente le nombre de tours fait par l'arbre transformant le mouvement lent en un mouvement rapide.
- ❖ **La génératrice** : elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.11.1. Avantages :

- ❖ Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre et ne nécessite aucun carburant pour fonctionner et elle ne crée pas de gaz à effet de serre.
- ❖ Chaque mégawatt heure éolien aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonnes des émissions de CO₂ rejetées annuellement par la production d'électricité d'origine thermique.
- ❖ Lorsque les grands parcs éoliens sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ et requis pour les éoliennes ; la surface restante est disponible pour l'exploitation agricole.
- ❖ L'éolienne est en grande partie recyclable après son temps de fonctionnement et elle est entièrement et rapidement démontable [5].

I.11.2. Inconvénients

- ❖ Bruit.
- ❖ Nuisance visuelle.
- ❖ Energie intermittente.

I.12. Types d'aérogénérateurs

Les aérogénérateurs se divisent en général en deux grands groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : l'éolienne verticale et l'éolienne horizontale.

I.12.1. Aérogénérateur à axe vertical

Les pales de l'aérogénérateur sont verticales, également nommée VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), tournent autour d'une tige positionnée verticalement. Cette solution est répandue que l'éolienne horizontale mais tend progressivement à la remplacer [13].

Son principal atout est sa capacité à capter des vents faibles :

- ✓ L'éolienne verticale n'a donc pas besoin de rafales ou de vents puissants, voire violents, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent.
- ✓ De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent [13].

Il en existe différents types d'aérogénérateur à axe verticale :

I.12.1.1 Aérogénérateur verticale type Darrieus

Du nom de son inventeur, l'éolienne verticale de type DARRIEUS (Voir figure I.12) produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différents types (hélicoïdale, H, cylindrique), qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes [14].

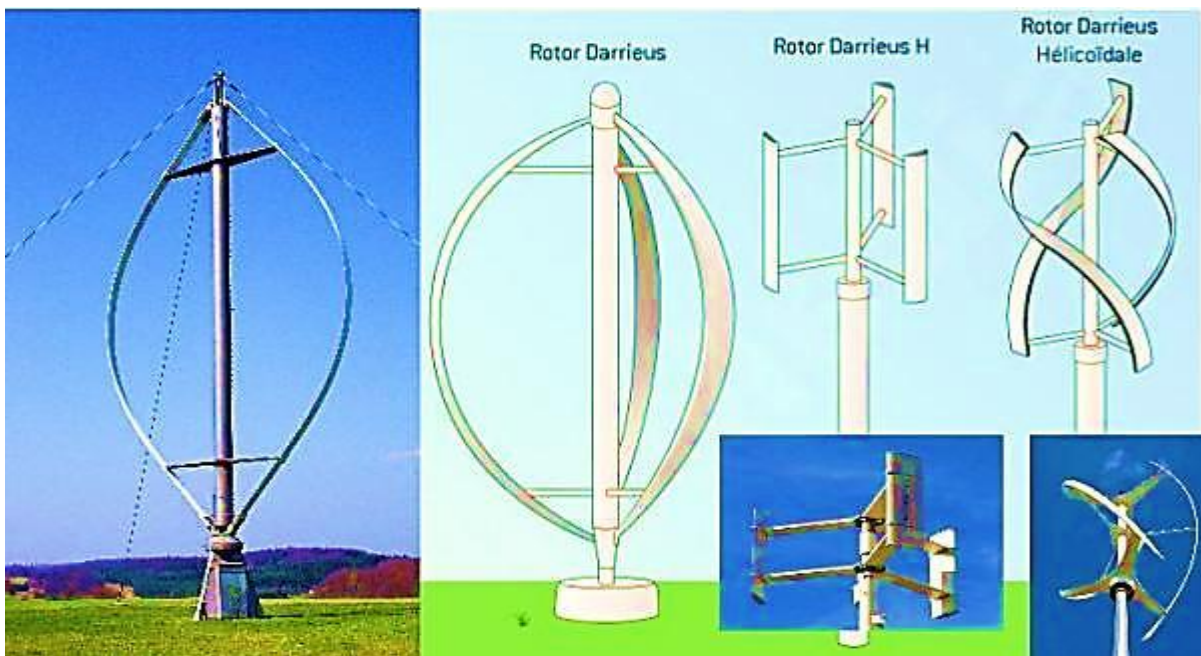


Figure (I.12) : Différents types d'aérogénérateurs de type Darrieus [21].

I.12.1.2. Aérogénérateurs domestiques type Savonius

Du nom de leur inventeur, Sigurd Savonius (Voir figure I.13) qui a breveté ce système en 1929, l'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre [14].

Le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres et le pousse. Les demi-cylindres n'étant pas rattachés en un même point, mais légèrement désaxés, le vent continue sa course dans l'autre demi-cylindre, qu'il pousse à son tour [14].

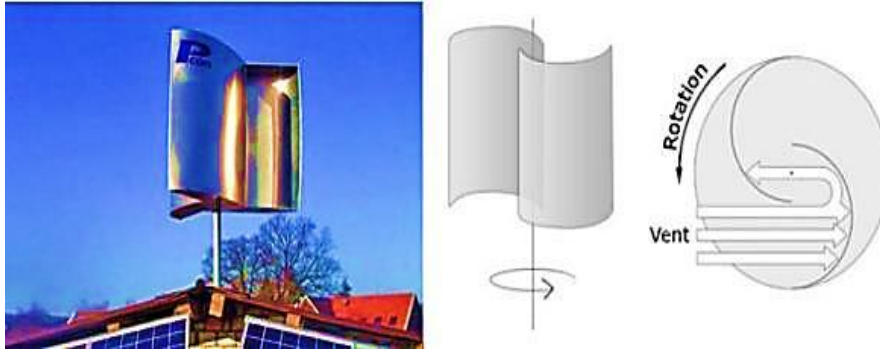


Figure (I.13) : Aérogénérateur de type Savonius [22]

I.12.1.3. Eolienne à voile tournante

L'éolienne à voile tournante a été inventée par Pierre Dieudonné en 2006. Elle consiste en quatre pales verticales reliées à des bras horizontaux. L'ensemble pivote sous l'effet du vent et, à la manière d'une voile de bateau, s'adapte à l'orientation du vent [14].

L'éolienne verticale à voile tournante présente de nombreux atouts :

- ✓ Les pales s'orientent constamment par rapport à la direction du vent et ont, de ce fait, une grande efficacité et un meilleur rendement.
- ✓ Ce fonctionnement réduit considérablement les nuisances sonores.
- ✓ Elle est moins encombrante que l'éolienne à axe horizontale [14].

I.12.2. Aérogénérateur à axe horizontal

Les turbines à axe horizontale (Voir figure I.14) sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pâles. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pâles. Une éolienne à axe horizontal est constituée d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pâles sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [15].



Figure (I.14) : Aérogénérateur à axe horizontal [22].

I.13. Classification des aérogénérateurs selon leur vitesse

I.13.1. Eoliennes à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable. Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixe tournent à une vitesse relativement constante.

Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable [6].

I.13.2. Eolienne à vitesse variable

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique, qui représente la vitesse du bout de pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance [23].

Le tableau (I.1) présente, les principaux avantages des turbines à vitesse variable. Ils sont caractérisés par leurs rendements de conversion d'énergie élevée, une énergie électrique de bonne qualité et absence de nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique.

Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique [6].

MODE DE FONCTIONNEMENT	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Vitesse fixe	Simple, robuste, fiable. Faible coût de construction et maintenance	Rendement de conversion d'énergie faible. Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci. Fluctuation importante de la puissance.
Vitesse variable	Fort rendement de conversion d'énergie. Puissance électrique de meilleure qualité. Stress mécanique réduit	Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs. Contrôle du système plus compliqué.

Tableau (I.1) : Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable [6].

I.14. Principe de conversion de l'énergie éolienne

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

- ❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la figure (I.15). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [15].

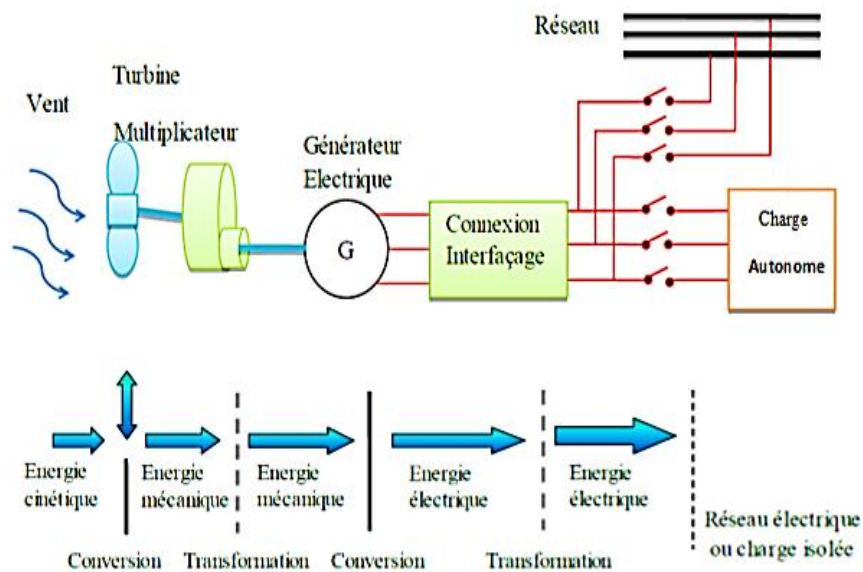


Figure (I.15) : Conversion d'énergie dans un aérogénérateur.

I.15. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique

I.15.1. Système utilisant les générateurs Asynchrone

Le terme de Machine Asynchrone « MAS » regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. En fait, le fonctionnement moteur de cette machine correspond au cas où elle transformerait l'énergie électrique qu'elle absorbe en énergie mécanique rotationnelle. L'opération inverse correspond au fonctionnement générateur. Entre autres, on peut distinguer deux principaux types de machine asynchrone : machines asynchrones à cage, machines asynchrones à double alimentation [16].

❖ Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone (Voir figure I.16) à cage d'écureuil équipe actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Cette machine est d'habitude utilisée comme moteur mais elle est tout à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa

robustesse, son faible cout ainsi que l'absence du système balais collecteur ou les systèmes de contact glissant [17].

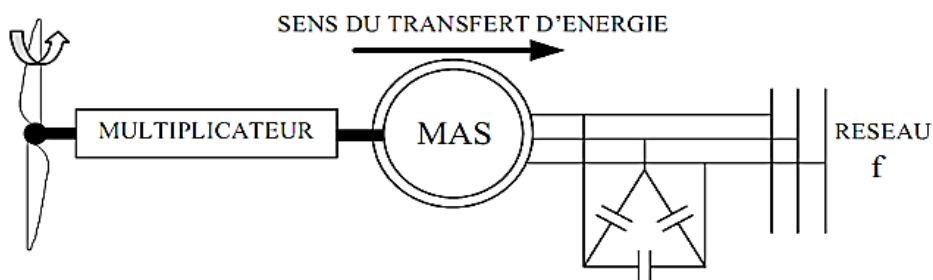


Figure (I.16) : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne [7].

❖ Machine asynchrone à double alimentation

La MADA (Voir figure I.17) est émergée en puissance dans le domaine de production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau en utilisant un système de protection et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique [7].

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins couteux figure (I.17).

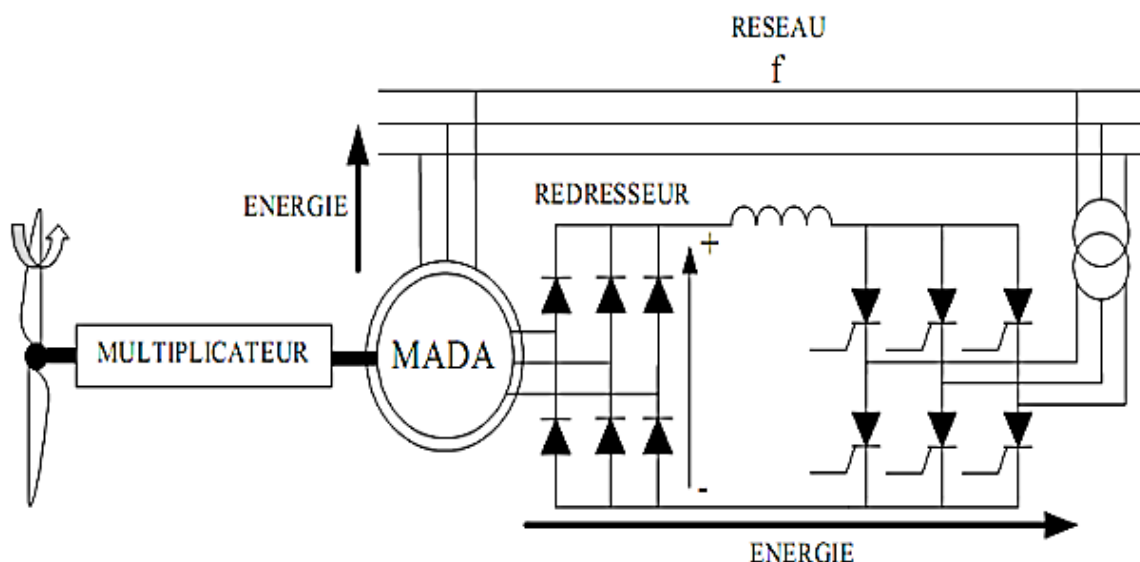


Figure (I.17) : MADA dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne [7].

I.15.2. Système utilisant les générateurs Synchrones

Le terme de Machine Synchrones MS regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique d'induit est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre les deux parties (l'inducteur et l'induit). Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas et à réluctance variable [18].

❖ Machine synchrone à rotor bobiné

Ce genre de machine (Voir figure I.18) est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. Ces bobines sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Il y a deux types de machines synchrones à rotor bobiné : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants [19].

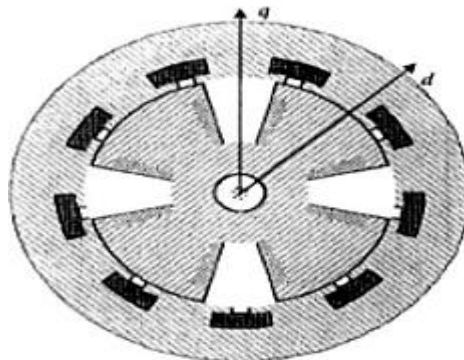


Figure (I.18) : Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants [19].

❖ Machine synchrone à aimant permanent :

La Machine Synchrones à Aimant Permanent (MSAP) (Voir Figure I.19) est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance. Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans les quelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120° . Le rotor de la machine synchrone à aimant permanent est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe.

- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer [20].

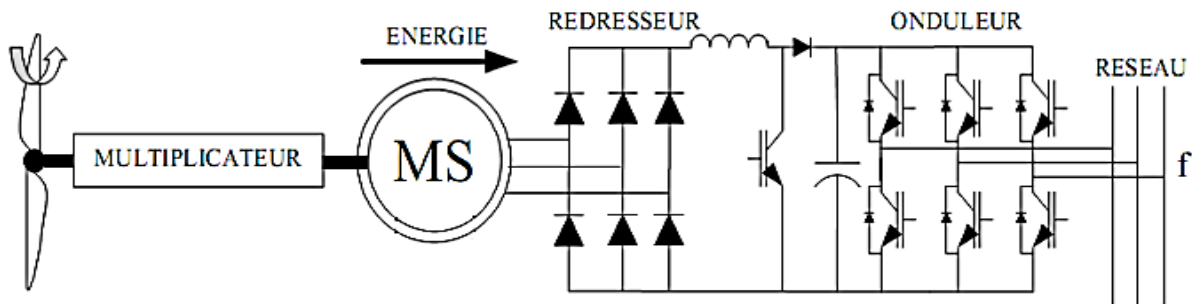


Figure (I.19) : Machine synchrone dans une chaîne de conversion d'éolienne [7].

I.16. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, les énergies solaire photovoltaïque et éolienne. Nous avons évoqué tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnement et leurs principes de conversion d'énergie.

Référence :

- [1] : B.FERRAH, « Etude d'un système Hybride (Photovoltaïque-éolien) », mémoire de Master, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2015.
- [2] : .B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.
- [3] : C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.
- [4] : <https://www.edf.fr> (20/4/2020)
- [5] : <https://6envroux.wordpress.com> (20/4/2020)
- [6] : S.ZIRAOU, «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau», mémoire Master, université BADJI MOKHTAR ANNABA 2017.
- [7] : A. TELLI, «Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégré au réseau MT', mémoire Magister, université de la science et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF, 2013.
- [8] : M. ADELIN, « les différents types de cellules photovoltaïque », le régulateur Bruxellois pour l'énergie, Bruxelles, 2019.
- [9] : Olivier GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Doctorat en électrotechnique, Ecole normale supérieure de Cachan, 2002.
- [10] : S.Mayouf, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle», mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf Msila 2016.
- [11] : A.Nechmi, « Aperçu sur le système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », mémoire de master, Ecole nationale supérieure d'hydraulique Arbaoui Abdellah, Blida, 2015.

[12] : B.Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », mémoire de Magister, université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2012.

[13] : N'Diaté Mohamed Melaïnine, Daff Bochraye, « Commande RST robuste d'un système de production éolien utilisant une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019.

[14] : <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/eolienne-verticale> (20/04/20)

[15] : M.Touati, « Etude d'une génératrice éolienne connectée au réseau électrique », mémoire de Magister, université de Batna, 2015.

[17] : R.Rouabhi, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application : énergie éolienne », mémoire de Magister, université Ferhat Abbas Sétif, 2012.

[16] : Dr.A.Kerboua, « cours machine électrique à courant alternatif », [http:// www.essa-tlemcen.dz](http://www.essa-tlemcen.dz)

[18] : A.Derkawi, « Etude, Développement et mise en œuvre de deux observateurs de position pour la commande sans capteurs de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) », Faculté des sciences Semlalia Merrakech – DESA diplôme d'études supérieures spécialisées, 2007.

[19] : LIVA ERIC RADAOROZANDRY, « CONCEPTION ET OPTIMISATION DES MACHINES SYNCHRONES AVEC DES MODÈLES ANALYTIQUES EN TENANT COMPTE DE LA SATURATION MAGNETIQUE », Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maîtrise es sciences (M. Se.), UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2007.

[20] : M.Bardadi, « Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel », mémoire de Magister, université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2015.

[21] : <https://sites.google.com/site/techno70100/6-types-d-eoliennes> (20/04/20)

[22] : <https://eolupjv.wordpress.com/les-types-deoliennes/> (20/04/20)

[23] : A.Zaimi, « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents », mémoire d'ingénieur, conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc, 2014.

[24] : N.GOUAR, A.MAHMOUDI, « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque » Université Larbi Ben M'Hidi- Oum El Bouaghi, 2017.

Chapitre II :
Les convertisseurs DC/DC et la commande
MPPT

II.1. Introduction

Les systèmes utilisés en électrotechnique permettent de transformer la nature de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique à une autre forme d'énergie et vice versa. Ces systèmes permettent la conversion de l'énergie mais ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique ou bien une charge électrique. Donc il faut faire recours à un dispositif électronique jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter les caractéristiques de la source (éolienne et solaire) afin d'assurer le bon fonctionnement.

Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite d'un point de poursuite maximal. Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, une étude est faite sur les convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continu. La conception d'un étage d'adaptation muni d'un algorithme MPPT permet d'optimiser la conversion énergétique.

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude du convertisseur DC-DC de type Buck-Boost. Quelques techniques de la commande MPPT existantes permettent de faire fonctionner notre système éolien et notre système photovoltaïque à leur puissance maximale.

II.2. CONVERTISSEURS STATIQUES

II.2.1. Définition

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge.

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

On distingue deux types de sources de tension :

- ❖ Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- ❖ Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V et de la fréquence f .

Ce fonctionnement de convertisseur est réalisé par des moyens purement électroniques (semi-conducteurs). Il permet :

- ❖ Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique.
- ❖ Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- ❖ Une réduction des masses et des volumes, et aussi du bruit [1].

II.2.2. Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques

L'énergie électrique (Voir figure II.1) est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques, pile à combustible,...). La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. Il existe donc quatre fonctions de base des convertisseurs statiques. Les convertisseurs qui transforment directement l'énergie électrique, sont appelés monoétages. Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie peut transiter de manière bidirectionnelle, c'est-à-dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes. Un convertisseur non réversible transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice [2].

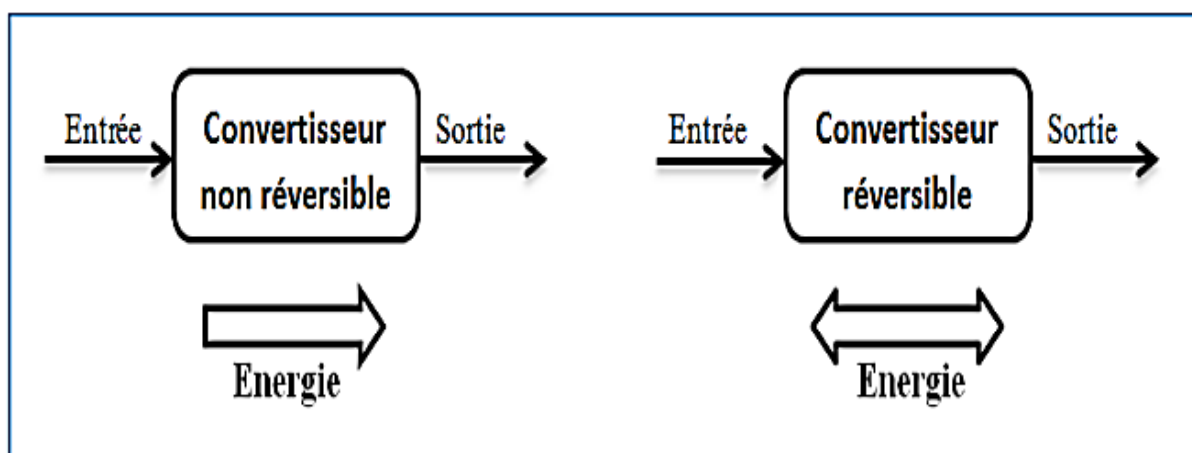


Figure (II.1) : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques [2].

II.3. Types des convertisseurs de tension DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs (Voir figure II.2) permettent d'abaisser, élever et inverser la tension continue avec de très faibles pertes, ils ont un très bon rendement, peu d'énergie à dissiper par le transistor [3].

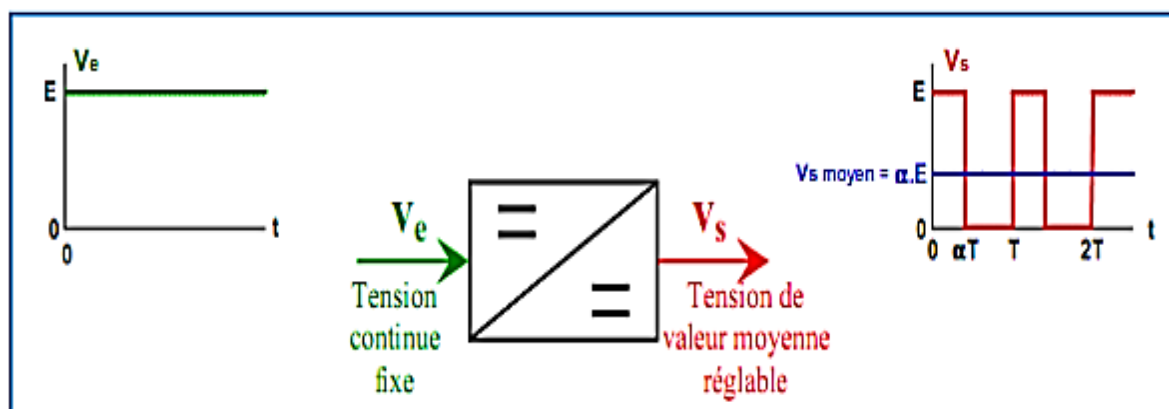


Figure (II.2) : Symbole et signaux du convertisseur DC/DC [3].

II.3.1. Hacheur dévolteur (Buck)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) (figure II.3) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode) [4].

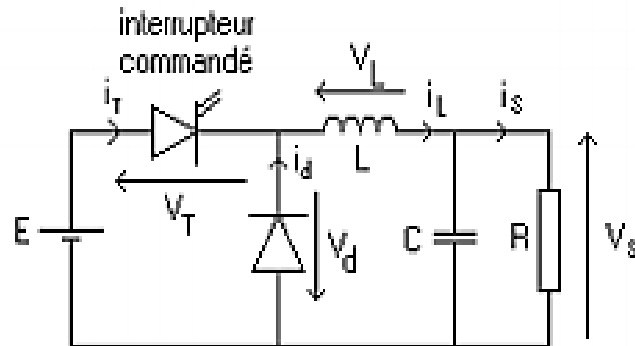


Figure (II.3) : Schéma de principe d'un hacheur dévolteur.

La charge est constituée par la résistance R. Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie. Si ces éléments sont correctement calculés, on peut supposer que i_s et V_s sont continus (on néglige l'ondulation résiduelle). L'ensemble (filtre + charge) peut être composé différemment, mais nous raisonnerons sur cet exemple par la suite [5].

II.3.1.1. Fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T ($T=1/f$), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$, avec α compris entre 0 et 1. α est appelé rapport cyclique. Lors de la seconde, on bloque le transistor. La diode devient passante. Cette phase dure de αT à T.

Dans l'étude du convertisseur Buck la figure (II.4) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source [6].

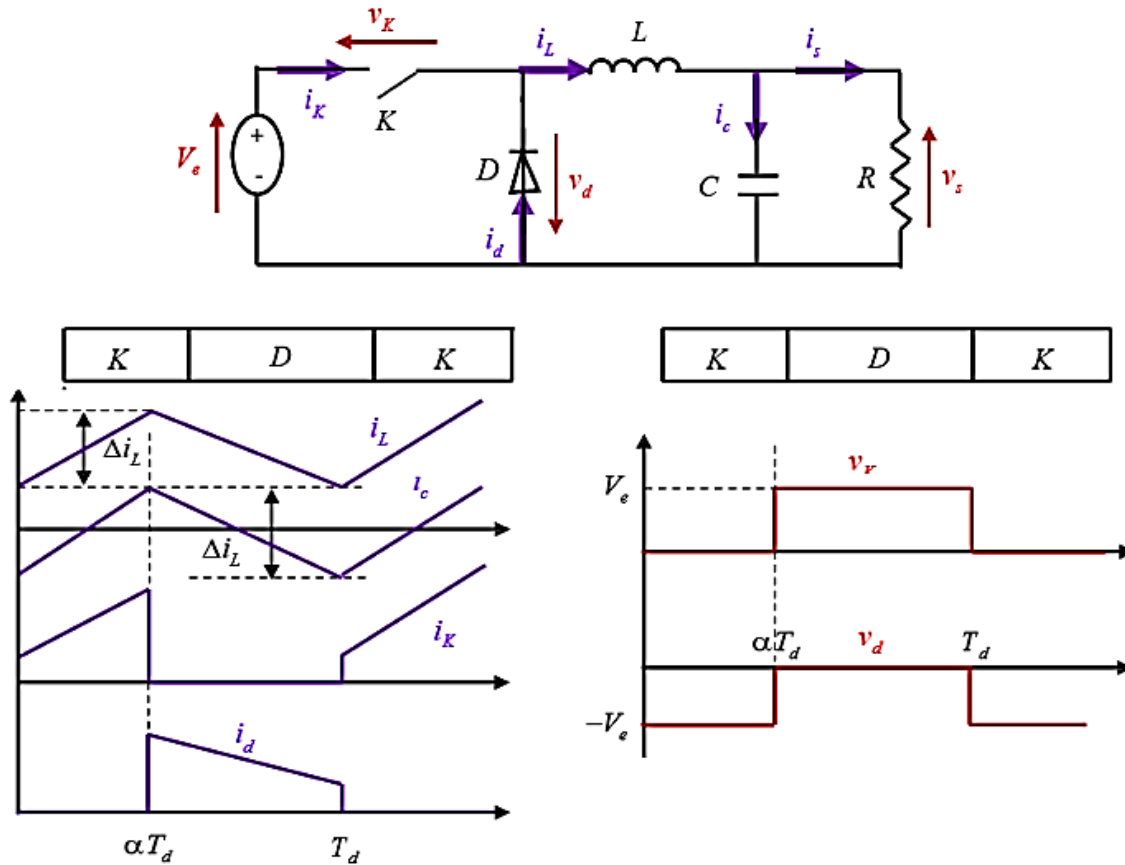


Figure (II.4) : Formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseur Buck [6].

Durant le premier mode, le courant de l'inductance i_L augmente linéairement parce que

$$L \frac{di_L}{dt} = v_e - v_s \quad (\text{II.1})$$

Quand $v_s - v_e$ est presque constant et positive. Durant le deuxième mode, le courant d'inductance roule librement à travers la diode et diminue linéairement parce que

$$L \frac{di_L}{dt} = 0 - v_s \quad (\text{II.2})$$

Quand $-v_e$ est presque constante est négative. Idéalement l'ondulation de courant doit traverser le condensateur [7]

A l'état d'équilibre, l'énergie nette changée dans l'inductance doit être nulle pendant une période, ce qui veut dire que le courant élevé dans le premier mode doit être égal au courant diminué dans le deuxième mode [7] :

$$\frac{\alpha T}{L} (v_e - v_s) = \frac{(1-\alpha)T}{L} v_s \quad (\text{II.3})$$

Avec la tension de sortie :

$$v_s = \alpha v_e \quad (\text{II.4})$$

II.3.2. Hacheur survolteur (Boost)

Dans ce hacheur (figure II.5), la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'où son nom. Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés) [4].

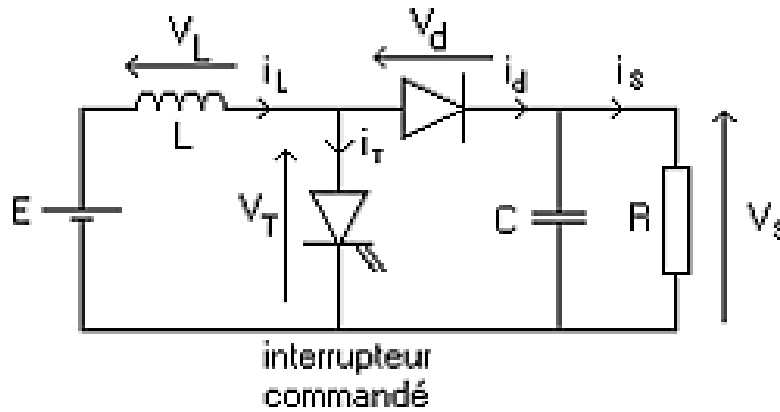


Figure (II.5) : Schéma de principe d'un hacheur survolteur.

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

II.3.2.1. Fonctionnement

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha.T$, l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée. Lors de la seconde partie du cycle, de $\alpha.T$ à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

Alors on distingue deux modes de fonctionnement. La figure (II.6) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite) [6].

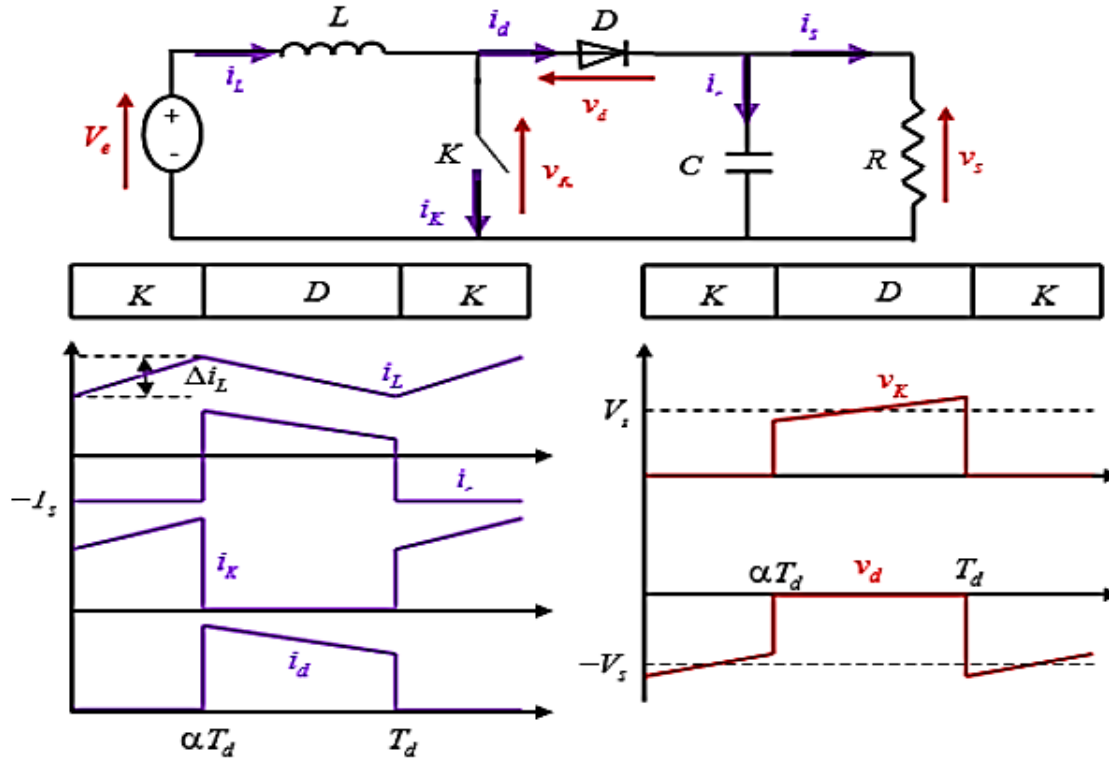


Figure (II.6) : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [6].

Durant le premier mode, le courant dans l'inductance augmente linéairement parce que

$$L \frac{di_L}{dt} = v_e - 0 \quad (\text{II.5})$$

Et l'inductance stocke l'énergie de la source tandis que le condensateur se décharge pour alimenter la charge.

Durant le deuxième mode, les deux énergies stockées dans l'inductance et dans la source sont transférées à la charge et le condensateur. Le courant de l'inductance diminue linéairement parce que :

$$L \frac{di_L}{dt} = v_e - v_s \quad (\text{II.6})$$

Similairement, l'énergie nette changée dans l'inductance doit être nulle pendant une période, ce qui veut dire que le courant élevé dans le premier mode doit être égal au courant diminué dans le deuxième mode [7].

$$\frac{\alpha T}{L} v_e = \frac{(1-\alpha)T}{L} (v_s - v_e) \quad (\text{II.7})$$

La tension de sortie peut être écrite comme suit :

$$v_s = \frac{1}{1-K} v_e \quad (\text{II.8})$$

II.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Le convertisseur Buck-boost (figure II.7) est également appelé abaisseur-élevateur à cause de son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée avec une polarité inverse. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique [8].

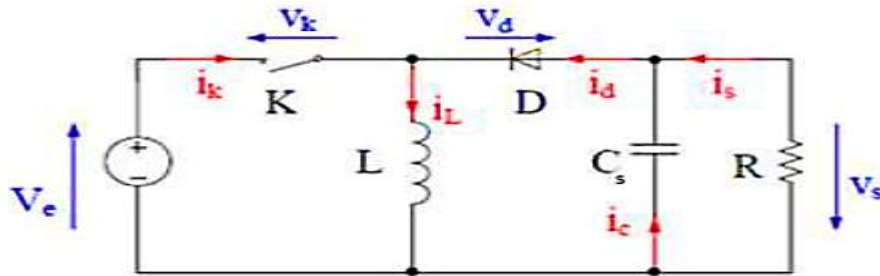


Figure (II.7) : Schéma de base d'un convertisseur Buck-boost.

Le circuit est alimentée par une source de tension V_e , la sortie est chargée par une résistance R et débite un courant I_s . L'interrupteur K , symbolisé ici comme un MOSFET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique α à la fréquence $f = 1/T$ [9].

On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance L est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période).

Le mode de conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur, nous n'étudierons que ce mode [9].

En conduction continu, les formes d'ondes de courant et de tension de ce convertisseur sont présentées dans la figure (II.8).

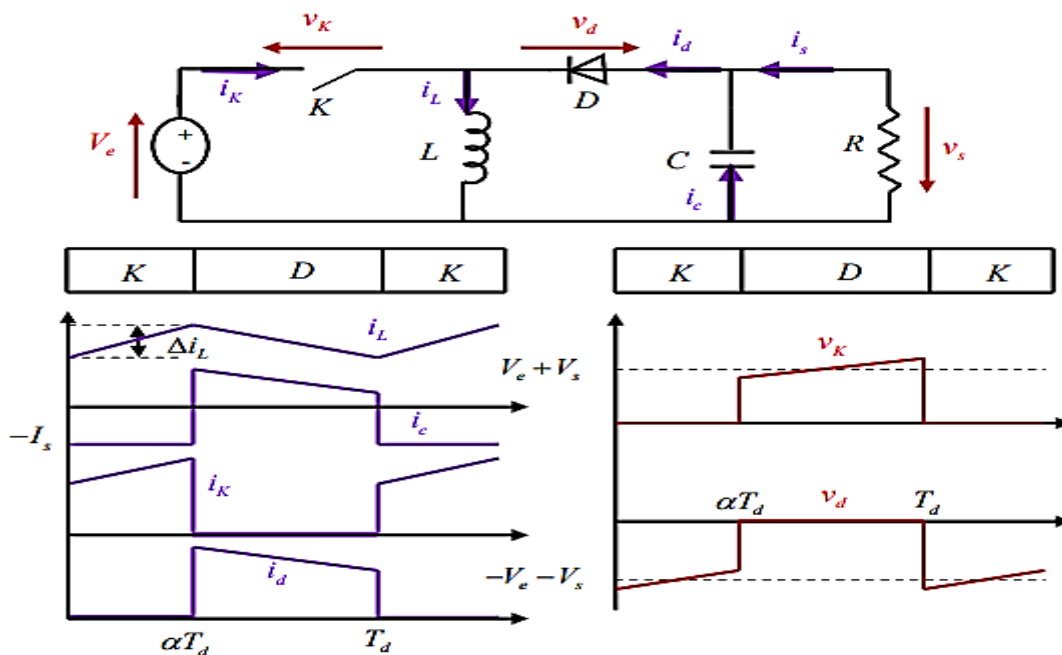


Figure (II.8) : Formes d'ondes de courant et de tension de convertisseur [6].

De l'intervalle $0 < t < \alpha T$:

L'interrupteur est fermé alors :

$$V_L = V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.9})$$

$$i_s = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$i_L = \frac{V_e}{L} t + I_{Lmin} \Rightarrow I_{Lmax} = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{Lmin} \quad (\text{II.11})$$

De l'intervalle $\alpha T < t < T$:

L'interrupteur est ouvert alors :

$$V_L = -V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.12})$$

$$i_s = i_L \quad (\text{II.13})$$

$$i_L = -\frac{V_e}{L} (t - \alpha T) + I_{Lmax} \Rightarrow I_{Lmin} = -\frac{V_e}{L} (1 - \alpha) T + I_{Lmax} \quad (\text{II.14})$$

La tension moyenne de sortie est donné par :

$$V_e \alpha T = V_s (1 - \alpha) T \quad (\text{II.15})$$

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \quad (\text{II.16})$$

Le courant moyen de sortie est donné par :

$$I_d = I_s \quad (\text{II.17})$$

$$I_s = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.18})$$

L'ondulation du courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (\text{II.19})$$

$$\Delta i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{Lmin} + \frac{V_e}{L} (1 - \alpha) T - I_{Lmax} \quad (\text{II.20})$$

$$\Delta i_L = \frac{V_s (1 - \alpha)}{L_f} = \frac{V_e \alpha}{L_f} \quad (\text{II.21})$$

L'ondulation de la tension de sortie est donnée par :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C_f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) RC_f} \quad (\text{II.22})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur de rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur inverseur en tension [10].

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes :

$$V_{K,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{II.23})$$

$$i_{K,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{II.24})$$

II.4. Principe de fonctionnement de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT (maximum power point tracking ou bien point de poursuite de puissance maximale) associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque par exemple de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum. La chaîne de conversion choisie sera optimisée à travers un convertisseur statique commandé par une MPPT [11]. Il peut être représenté par le schéma de la figure (II.9).

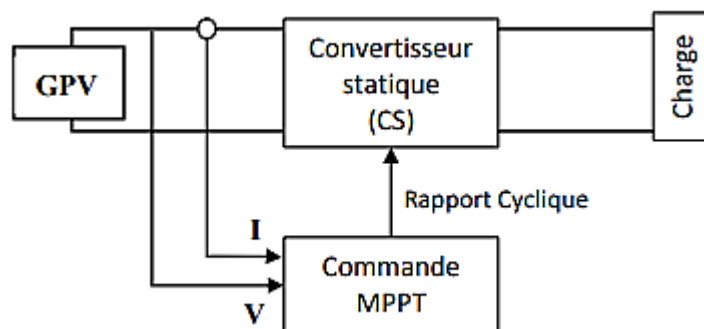


Figure (II.9) : Chaîne de conversion d'énergie solaire [11].

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance qu'un générateur peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier jusqu'à se placer sur le MPP [11].

II.5. Classification des commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de fonction qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [12].

II.5.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

II.5.1.1. Commande MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectuent une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par exemple par le GPV (générateur photovoltaïque). Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance utilisent la valeur de la

puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM, ou bien les commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximale et les paramètres caractéristiques du module PV. Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stockés tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [12].

II.5.1.2. Commande MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs statique. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable [12].

II.5.2. Classifications des commandes MPPT selon le type de recherche

II.5.2.1. MPPT indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées, qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [12].

II.5.2.2. MPPT direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de

fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi, placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [12].

II.6. Algorithmes MPPT

Il existe dans la littérature [13] plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont :

- ❖ Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage).
- ❖ Algorithme du Courant constant (Constant Courant).
- ❖ Perturbation et Observation (P&O, Perturbe and Observe).
- ❖ Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).
- ❖ Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente).
- ❖ Algorithme à base de logique floue.

II.7. Méthodes de recherche MPPT

II.7.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension, ou du courant, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [12].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension, ce qui engendre une variation de la puissance. Donc on peut déduire que si une

incréméntation positive de la tension engendre un accroissement de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [12].

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

La Figure II.10 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O :

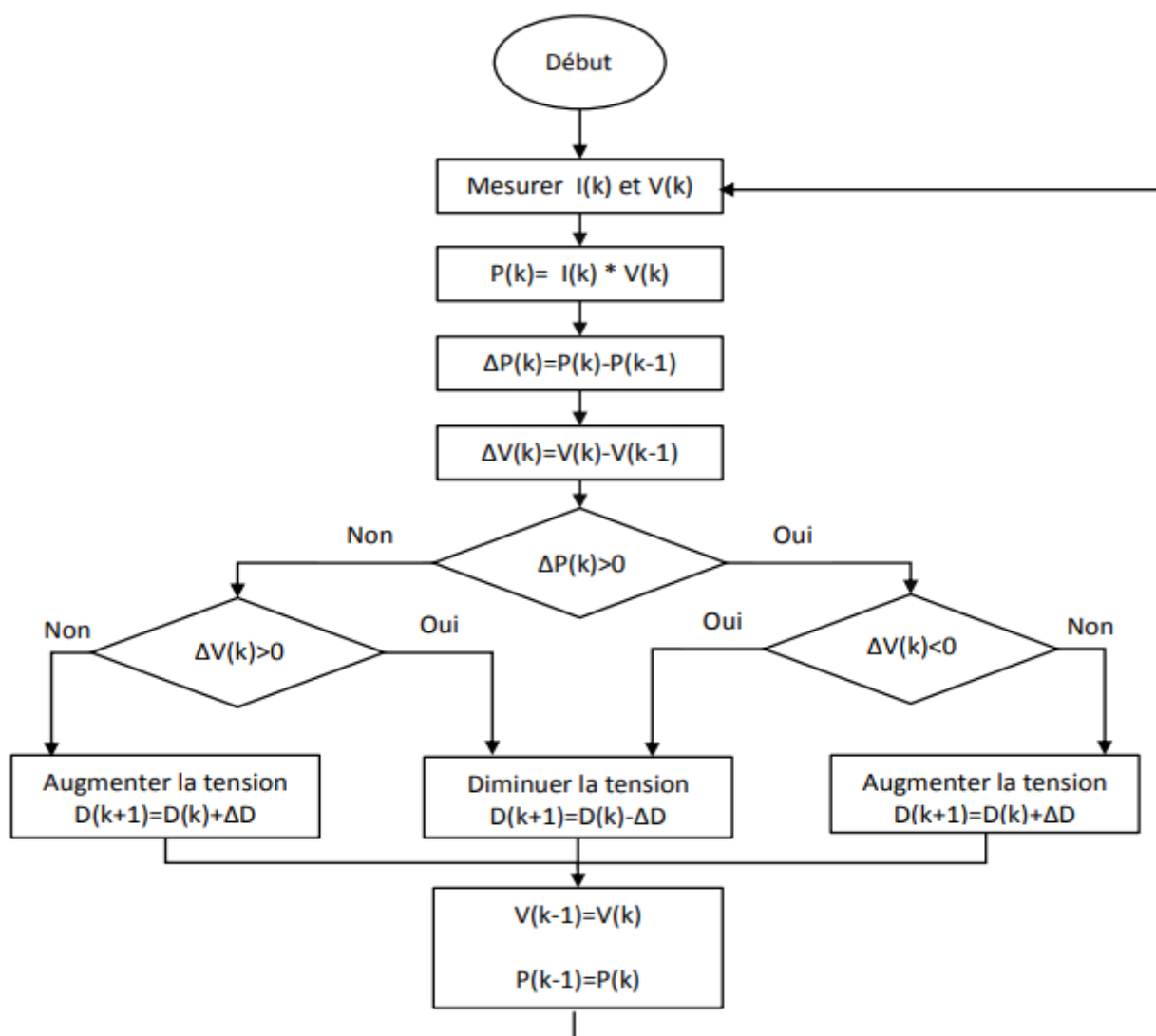


Figure (II.10) : Organigramme de la commande MPPT P&O [11].

II.7.2. Méthode de conductance incrémentale

Par exemple Le courant de sortie d'un panneau et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. Son principe consiste à comparer entre la conductance et de sa dérivée et de décider quand augmenter ou diminuer la tension afin d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ($\frac{dP}{dV} = 0$) [14].

La méthode de conductance incrémentielle (Voir figure II.11) est souvent jugée efficace de point de vue efficacité de recherche du point de puissance maximale.

Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une capacité de calcul grande, ce qui réduit la période de contrôle du système.

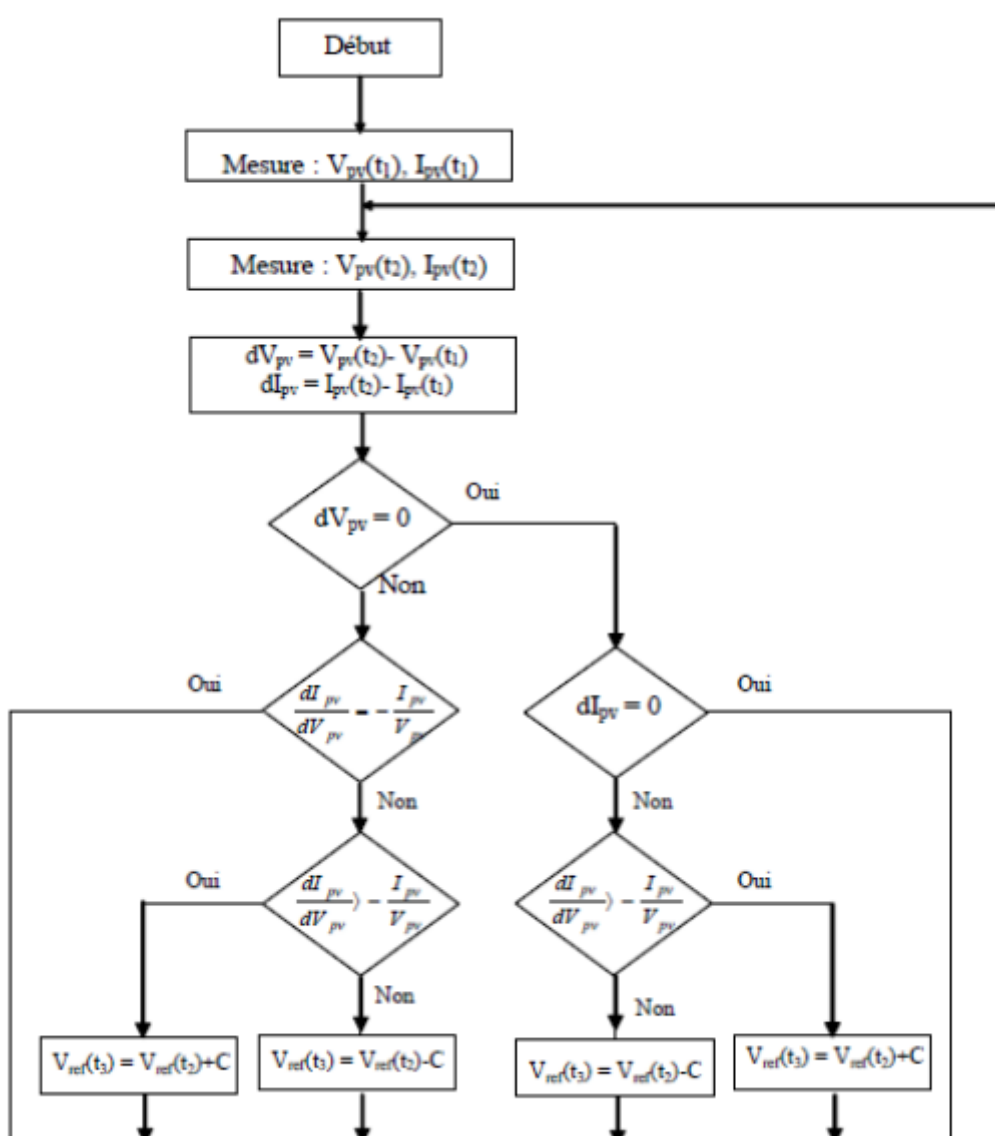


Figure (II.11) : Organigramme de la méthode de conductance incrémentielle [14].

II.8. Technique de la commande PWM :

Les techniques de la commande PWM (Pulse Width Modulation), appelée aussi modulation de largeur d'impulsion sont multiples. Cependant quatre catégories seulement ont été développées et sont donnée comme suit :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général triangulaire.
- Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre harmonique.
- Les modulations post-calculées encore appelées PWM régulières symétriques ou PWM vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.
- Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité, le développement considérable de la technique de modulation de largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs [6].

II.8.1. Principe de la commande PWM

Le principe de base de la commande PWM est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour l'obtention d'un signal PWM est de comparer deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de l'application.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [6].

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé quelques topologies de base des convertisseurs continu-continu comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et le convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

On a aussi présenté la commande MPPT des convertisseurs continu-continu pour la recherche du point où la puissance est maximale, ainsi que les différents types de cette commande tel que l'algorithme de perturbation et observation et l'algorithme de conductance incrémentale.

On a conclu le chapitre par le principe de la commande PWM.

Référence :

- [1] : M.BELKACEM, « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », mémoire Master, université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen, 2015.
- [2] : Dr.F.Bouchafaa, «Cours Électronique de puissance», [http : //www.usthb.com](http://www.usthb.com), 2008/2009.
- [3] : L.Targant, S.Khalef, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique», MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [4] : S.Mayouf, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle», mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf Msila 2016.
- [5] : www.abcelectronique.com/cours/leshacheurs (20/04/20).
- [6] : T.TOUAMA, N.HAFIDI, « Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque », mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf Msila, 2019.
- [7] : Quing-Chang Zhong, T.HORNIK, « Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration », A John Wiley & sons, Ltd, Publication, IEEE PRESS, 2013.
- [8] : A.El fatmi, M.Wene, « Les convertisseurs DC-DC pour l'exploitation de L'énergie des panneaux photovoltaïques», mémoire de master, C.U.B.B.A.T, 2015.
- [9] :https://www.academia.edu/31800283/Chapitre_II_Dimensionnement_et_conception_des_hacheurs_Buck-Boost_and_%C3%87uk_II.1_Introduction 20/04/20
- [10] : A.Belkaid, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome», Thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif, 2015.
- [11] : F.Benadel, «Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV », mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf Msila 2016.
- [12] : A.Hakoumi, A.Benamar, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par logique floue », mémoire master, université Ahmed Draia Adrar 2018.

[13] : <http://energie28.blogspot.com> (20/04/20)

[14] : S.Miezzai, K.Tadjine, « Etude d'un système hybride (Eolien-Photovoltaïque) », mémoire de Master, université Abderrahmane Mira – Bejaia 2015.

Chapitre 3 :

Modélisation et simulation d'un aérogénérateur et d'un système photovoltaïque

III.1.Introduction :

La modélisation est représentée par une forme mathématique (une fonction) ou un processus technologique. Elle a pour but l'étude théorique du comportement de certains paramètres et de les optimiser en tenant en compte une contrainte donnée.

A cet effet, pour étudier le comportement dynamique de notre système, la modélisation de chaque élément est indispensable. Le système est composé essentiellement d'un générateur PV, d'un générateur éolien, des convertisseurs DC/DC, AC/DC. Dans ce qui suit, nous présentons les modèles mathématiques de chacun des éléments composants le système ainsi que les résultats obtenus après simulation de chaque élément constituant notre système.

Le programme de simulation est mis au point pour prédire le comportement de chaque système. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel Matlab/Simulink.

III.2.Structure de la chaine de conversion photovoltaïque :

Le but de cette section est de décrire les modèles mathématiques des composants du système de conversion photovoltaïque. Le schéma bloc de la chaîne de conversion photovoltaïque étudiée dans le cadre de ce travail est présenté dans la figure (III.1). Il s'agit d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur DC/DC de type Buck-Boost muni d'une commande MPPT, pour maximiser l'énergie photovoltaïque [1].

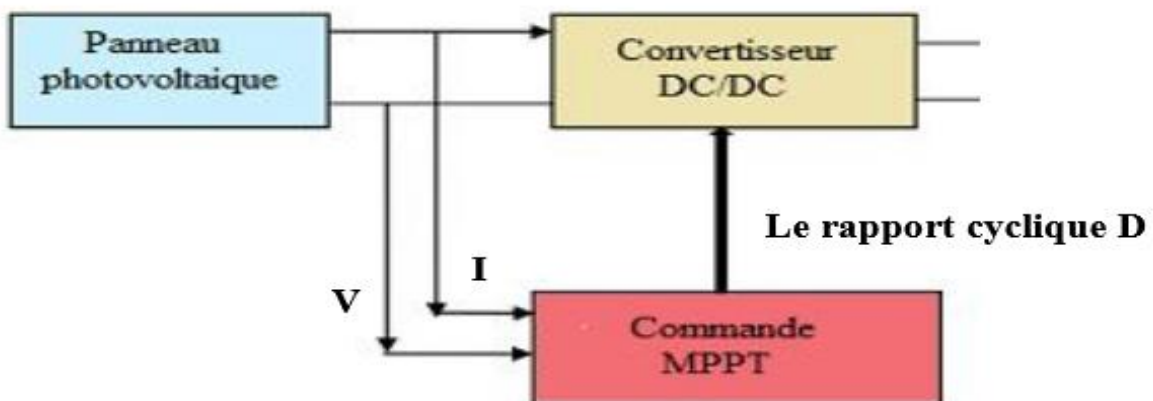


Figure (III.1) : Schématisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec MPPT [1].

III.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Il est réalisé par association en série et en parallèle de modules (ensemble de cellules élémentaires). La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier.

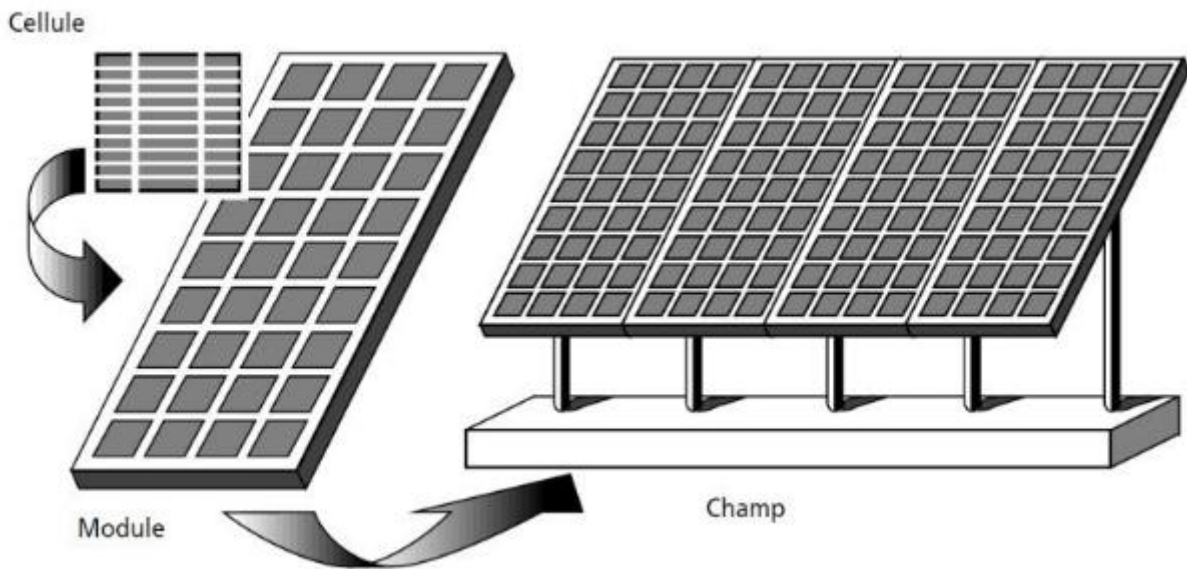


Figure (III.2) : Composants d'un générateur photovoltaïque [1].

Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque. Parmi ces modèles, on trouve [2] :

- ❖ Le modèle idéalisé : c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est donc supposée nulle.
- ❖ Le modèle à une diode : pour tenir compte des chutes de tensions dans les zones P et N, on doit ajouter une résistance série R_s dans le modèle idéalisé, et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_{sh} .
- ❖ Le modèle à deux diodes : une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons.

Nous avons choisi le modèle à une diode qui est le plus classique et le plus utilisé. Ce modèle fait intervenir une source de courant qui génère un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement, une

diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule traversée par le courant I_d , complété par une résistance série R_s et une autre parallèle R_{sh} pour les pertes. Comme il est montré dans la figure (III.3).

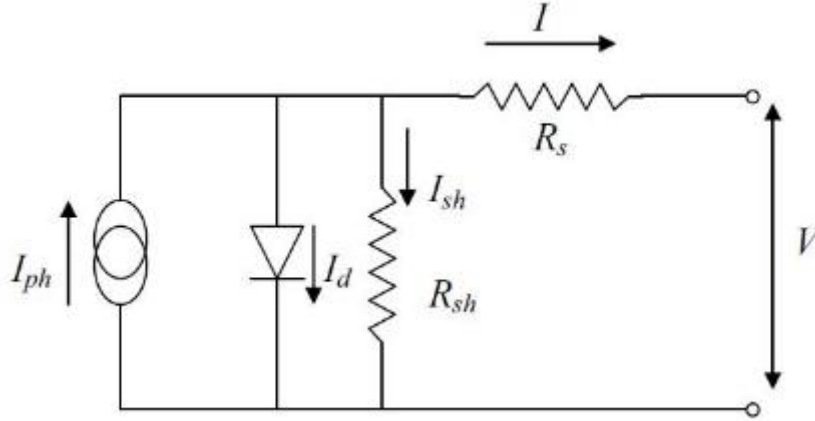


Figure (III.3) : Schéma équivalent d'une cellule PV.

Le courant de la cellule est donné par :

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{n * V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{R_{sh}} \quad (III. 1)$$

$$V_T = \frac{K * T}{e} \quad (III. 2)$$

La loi de nœuds permet de d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \quad (III. 3)$$

A partir de ce circuit on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_d = I_{sat} * \left(\exp \left(\frac{q * (V + I * R_s)}{n * K * T_c} \right) - 1 \right) \quad (III. 4)$$

Le courant de la résistance shunt R_{sh} :

$$I_{sh} = \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (III. 5)$$

A partir de l'équation (III.3), on obtient l'équation de la caractéristique I-V du modèle choisi :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{q * (V + I * R_s)}{n * K * T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (III. 6)$$

Avec :

I_{sat} : courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A).

n : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque.

K : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

q : Charge d'électron.

T_c : Température absolue de la cellule (K).

La température de la cellule est donnée par l'équation suivante :

$$T_c = T_a + (N_{oct} - T_{a\ Noct}) * \frac{G}{G_{Noct}} \quad (III. 7)$$

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Température nominale de fonctionnement de cellules.

$T_{a\ Noct}$: température ambiante à N_{oct} .

G : Rayonnement solaire.

G_{Noct} : Rayonnement solaire à N_{oct} .

Le photo courant est donnée par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} * I_{cc\ ref} [1 + K_i(T_c - T_{ref})] \quad (III. 8)$$

$I_{cc\ ref}$: Courant de court-circuit de référence.

K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit.

Le courant de saturation peut être calculé à partir de l'équation :

$$I_{sat} = \frac{I_{ph}}{\exp \left(\frac{V_{co}}{n * V_T} \right) - 1} \quad (III. 9)$$

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

La résistance parallèle R_{sh} a une valeur assez élevée. Alors le courant généré par la cellule peut être donné sous la forme :

$$I = I_{ph} \left[1 - \frac{\left(e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot V_T} \right)} - 1 \right)}{e^{\left(\frac{V_{co}}{n \cdot V_T} \right)} - 1} \right] \quad (III. 10)$$

Le courant de court-circuit est la plus grande valeur du courant générée par la cellule sous les conditions du court-circuit quand $V=0$. La variation du courant de court-circuit est en fonction de l'éclairement et de la température de jonction aux conditions standards. Sa forme est donnée par la formule suivante :

$$I_{cc} = \frac{G}{G_{ref}} * I_{cc\ ref} [1 + K_i(T_c - T_{ref})] \quad (III. 11)$$

La tension de circuit ouvert est la tension à travers la jonction/diode PN quand $I=0$. Elle représente la tension de cellule lorsqu'elle est à l'ombre. Elle est donnée par :

$$V = V_{co} = n \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (III. 12)$$

La variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'éclairement et de la température de jonction aux conditions standards est la suivante :

$$V_{co} = V_{co-ref} + K_{Vco}(T_c - T_{ref}) + n \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (III. 13)$$

Avec : K_{vco} coefficient de température de tension de circuit ouvert.

III.2.1.1. Modèle sous Matlab/Simulink :

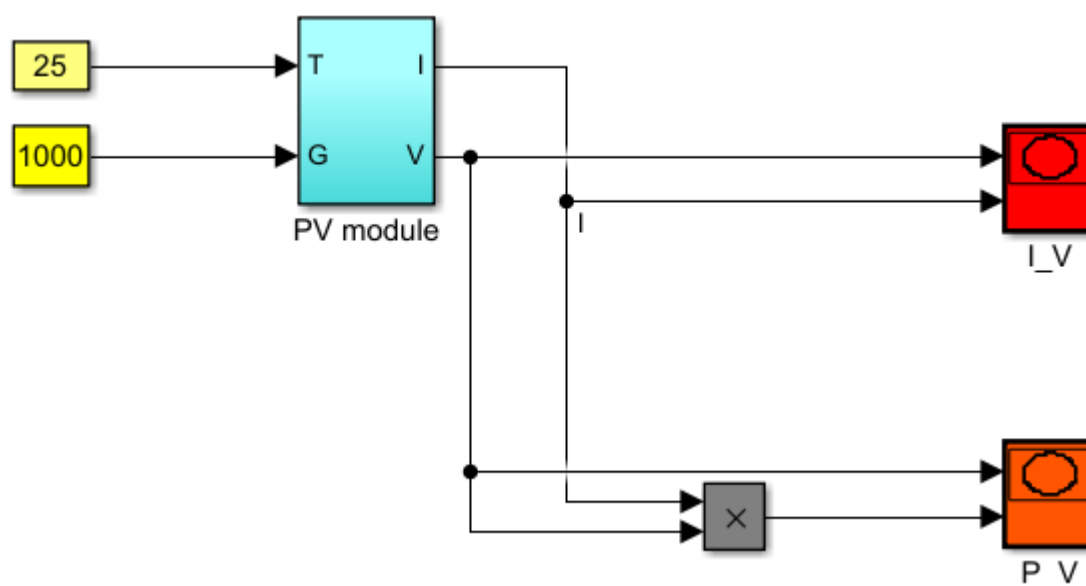
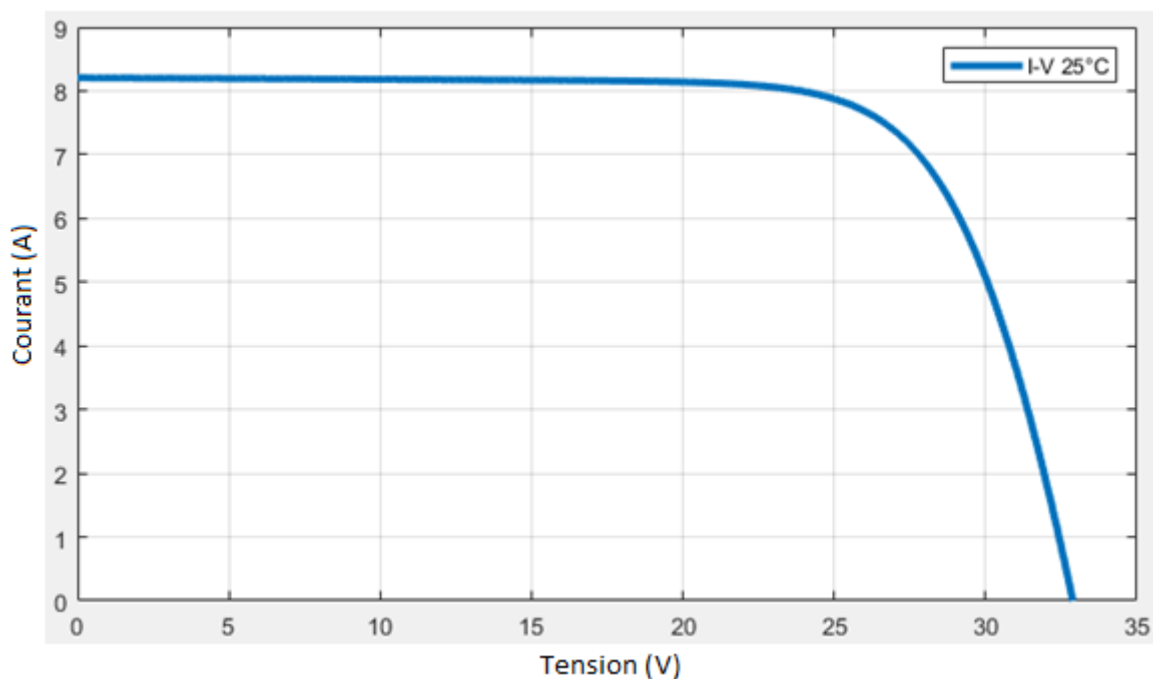


Figure (III.4) : Modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab.

III.2.1.2. Caractéristique I(V) et P(V) :

Les figures (III.5) et (III.6) respectivement représentent les courbes I-V et P-V du panneau solaire sous les conditions de température et d'irradiation de référence (25°C et $1000\text{W}/\text{m}^2$) :



Figure(III.5) : Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque.

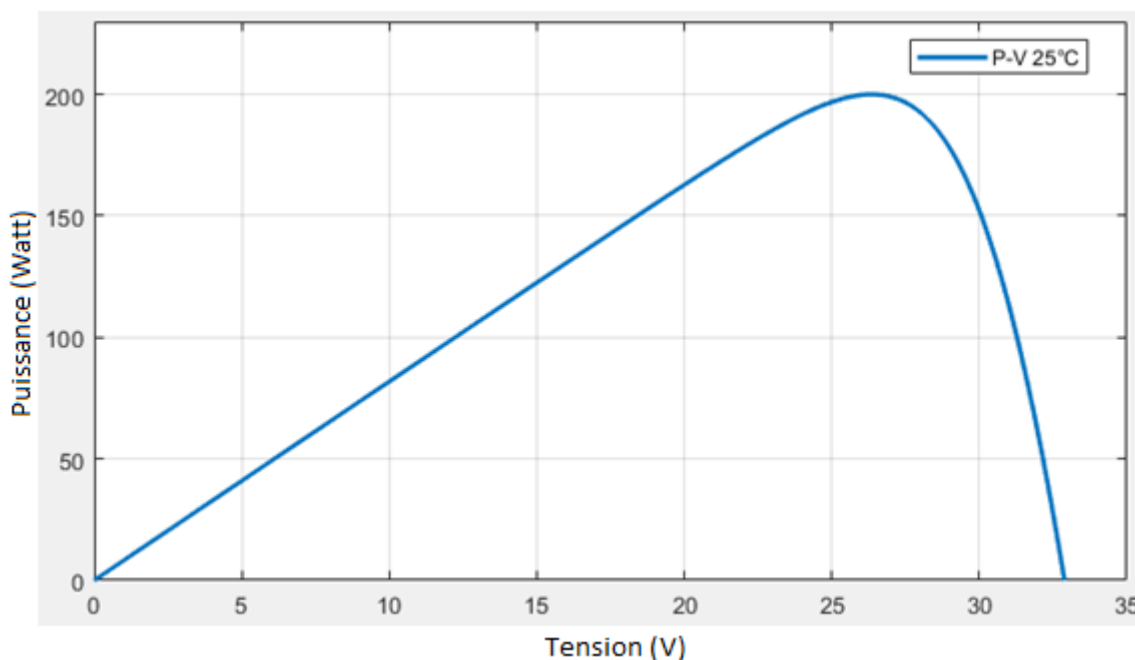


Figure (III.6) : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.

- **Puissance crête** : la puissance électrique produite par un module varie en fonction du rayonnement solaire, la puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairage de 1000 W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C [1].
- **Rendement** : le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules, il passe par un maximum que l'on appelle le point de puissance maximale [1].
- **Caractéristique courant-tension d'un module** : le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant / tension et puissance / tension, (figure (III.4) et (III.5)). Il dépend de l'éclairage solaire et de la température des cellules [3].

III.2.1.3. Influence de la température sur les courbes I-V et P-V :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

Les figures (III.7) et (III.8) représentent les caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire à irradiation constante (1000 W/m^2) et à différentes valeurs de températures.

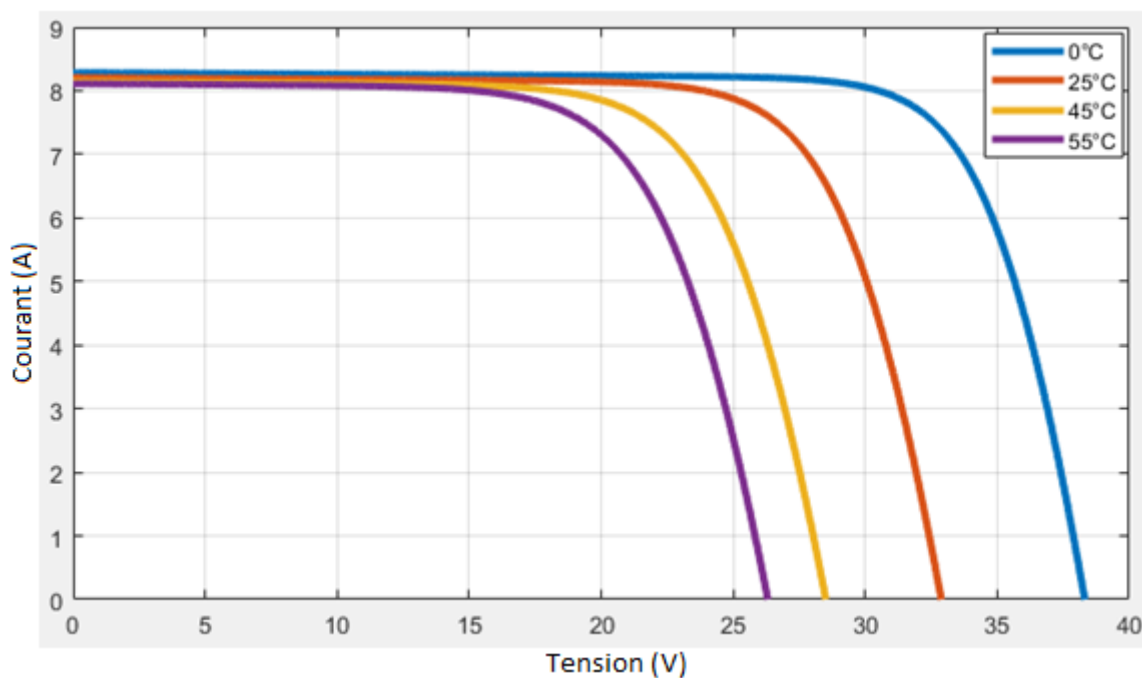


Figure (III.7) : Influence de la température sur la caractéristique I-V.

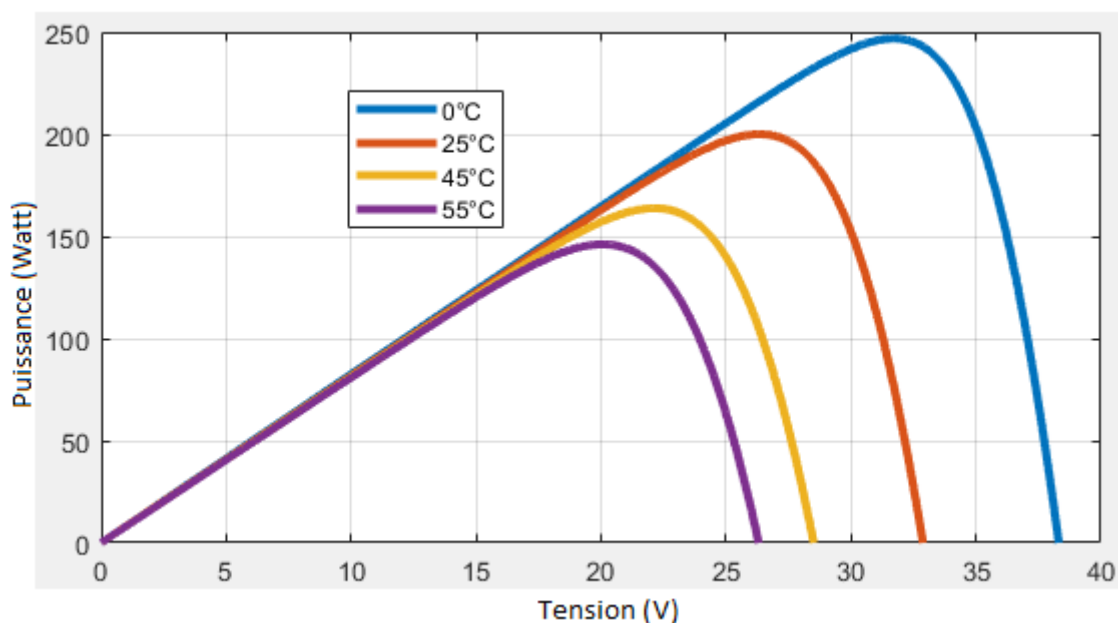


Figure (III.8) : Influence de la température sur la caractéristique P-V.

D'après ces figures, on remarque que plus la température augmente plus la tension diminue ce qui engendre une diminution du point de puissance maximum. Autrement dit la tension d'une cellule solaire est inversement proportionnelle à la température de la cellule. Alors on peut dire que la cellule produit moins d'énergie lorsqu'elle chauffe. Et l'augmentation de la température n'a pas pour seule conséquence la baisse de rendement. En effet une forte température peut également

endommager les cellules, sans oublier, que la température contribue à l'accélération du vieillissement des cellules.

III.2.1.4. Influence de l'irradiation sur les courbes I-V et P-V :

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Les figures (III.9) et (III.10) représentent les caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire à température fixe (25°C) et à différentes valeurs d'irradiation.

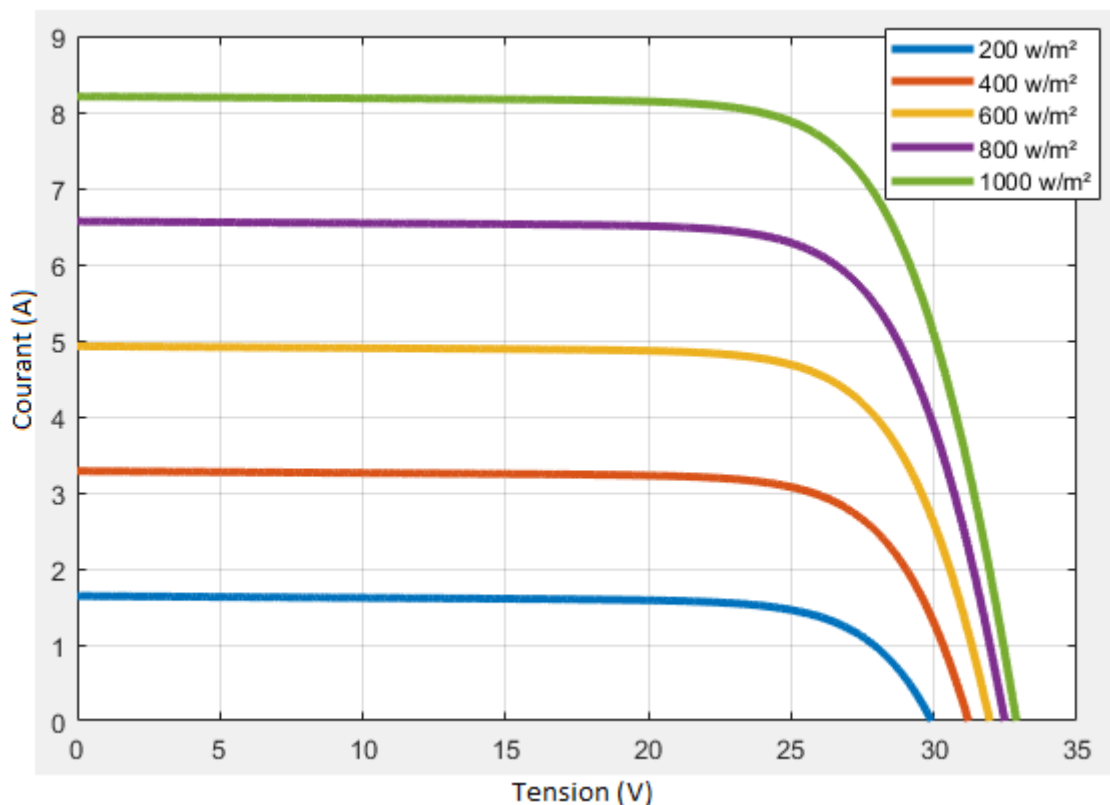


Figure (III.9) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I-V.

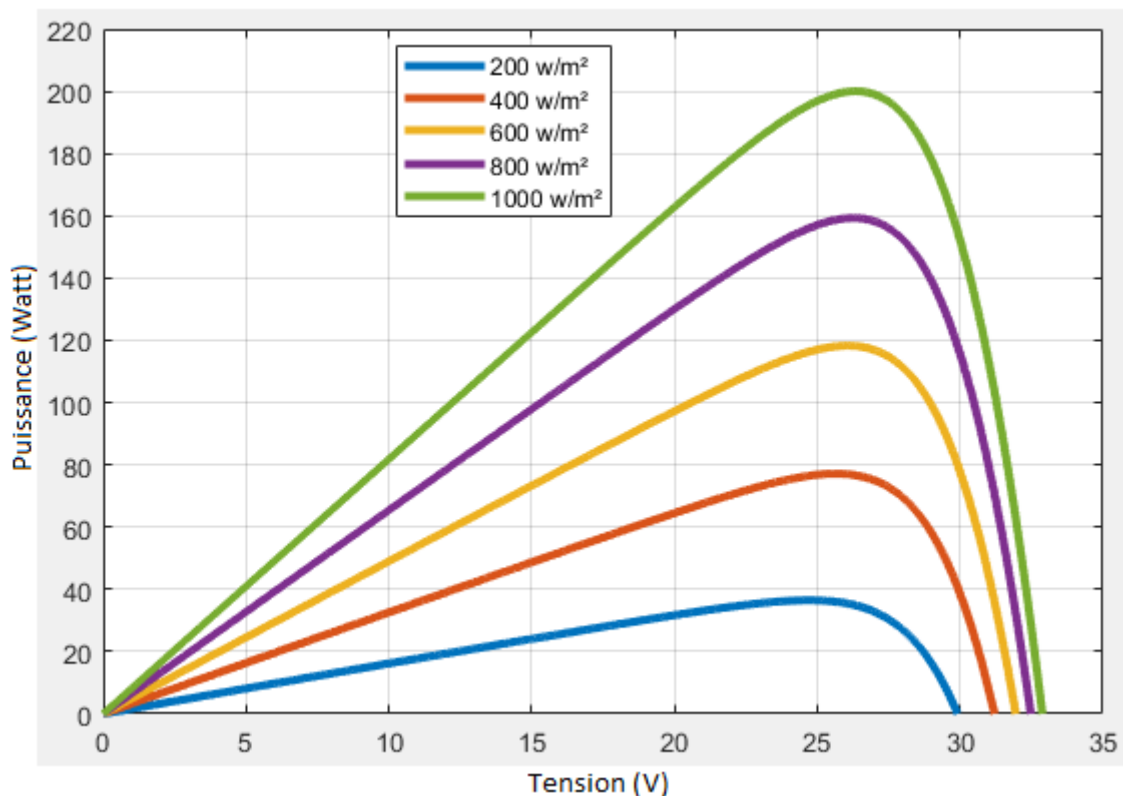


Figure (III.10) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P-V.

On observe que lorsque l'ensoleillement augmente, la tension et le courant augmentent ce qui implique que la puissance augmente. De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue.

Alors on peut dire que pour obtenir une grande puissance, il serait plus intéressant d'avoir une irradiation importante sous une basse température.

III.2.2. Modèle d'un hacheur Buck-Boost :

Pour que le panneau PV fonctionne dans les points de puissance maximale, la mise en place d'un étage d'adaptation entre la charge et le générateur PV est nécessaire. Cet étage est un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost.

La figure (III.11) représente le schéma bloc d'un convertisseur dévolteur survolteur sous le logiciel Matlab/Simulink.

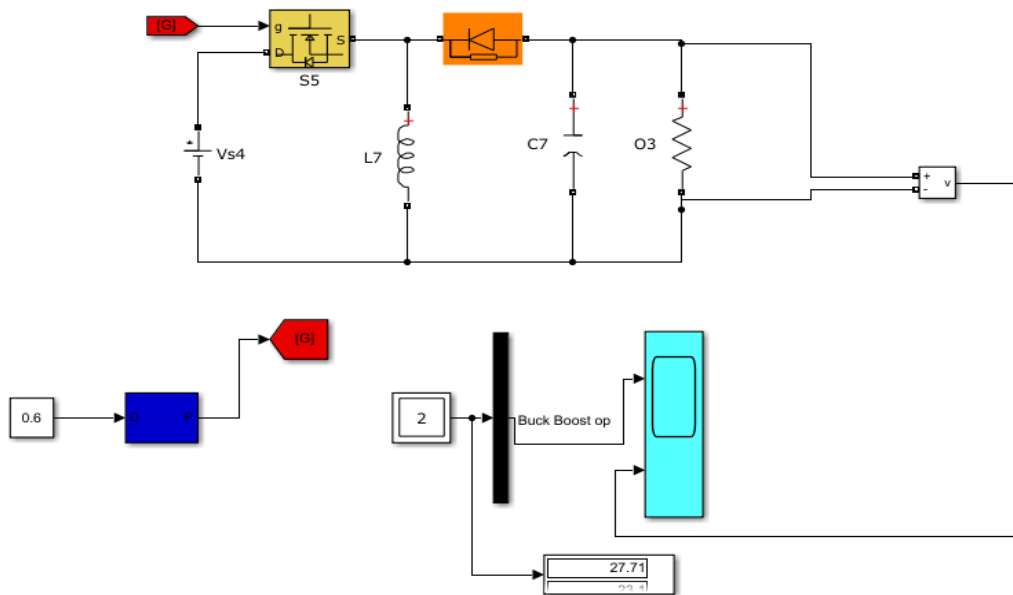


Figure (III.11) : Schéma bloc du convertisseur Buck-Boost.

Pour cette simulation les paramètres choisis sont :

$$V_e = 24V, L = 47 \cdot 10^{-6} H, C = 330 \cdot 10^{-6} F, R = 10.5\Omega$$

Ce convertisseur peut être élévateur et abaisseur en tension, tout dépend du rapport cyclique choisi, les figures (III.12) et (III.13) respectivement représentent les courant et tensions de sortie du convertisseur en fonction du rapport cyclique.

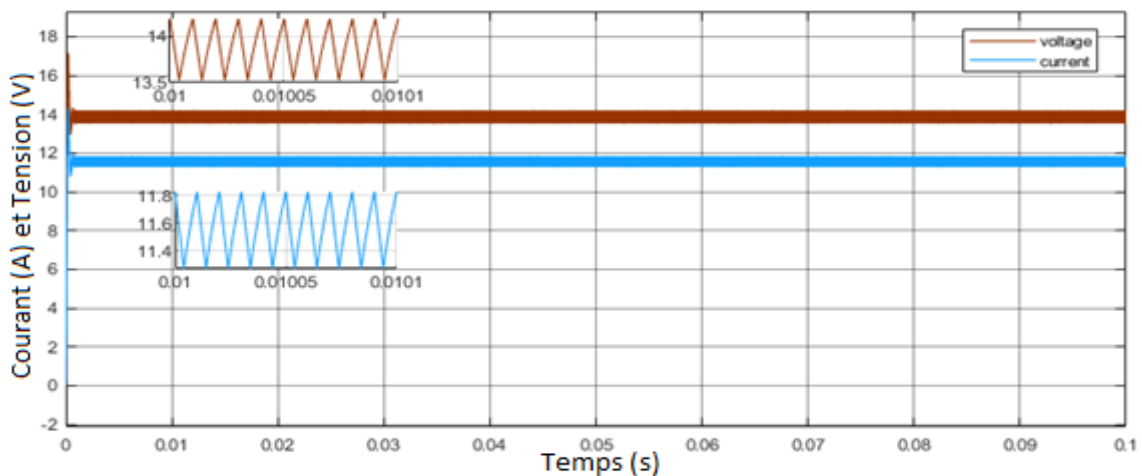


Figure (III.12) : Forme d'onde de courant et de tension à la sortie lorsque le convertisseur est abaisseur.

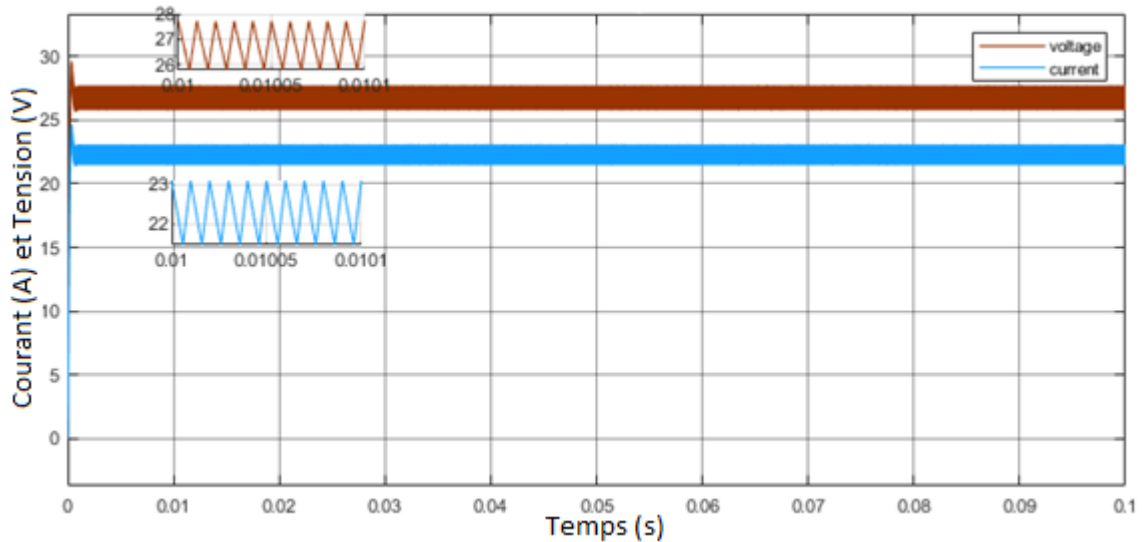


Figure (III.13) : Forme d'onde de courant et de tension à la sortie lorsque le convertisseur est élévateur.

D'après ces deux figures on remarque que le convertisseur est abaisseur en tension lorsque le rapport cyclique est inférieur à 0.5. Dans notre cas c'est 0.4, la tension diminue de 24V à 14V, Et il est élévateur en tension lorsque le rapport cyclique est supérieure à 0.5 dans la simulation, il est choisi égal à 0.6. La tension a augmenté de 24V à 27V. Donc le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs Buck et Boost, alors le Buck-Boost achève très bien son travail.

III.2.3. Simulation de la méthode MPPT P&O :

La figure (III.14) illustre le bloc schématique de Simulink de la commande de poursuite de maximum de puissance suivant l'organigramme mentionné dans le deuxième chapitre, cette commande a comme entrée le courant et la tension du panneau et la sortie le rapport cyclique du convertisseur.

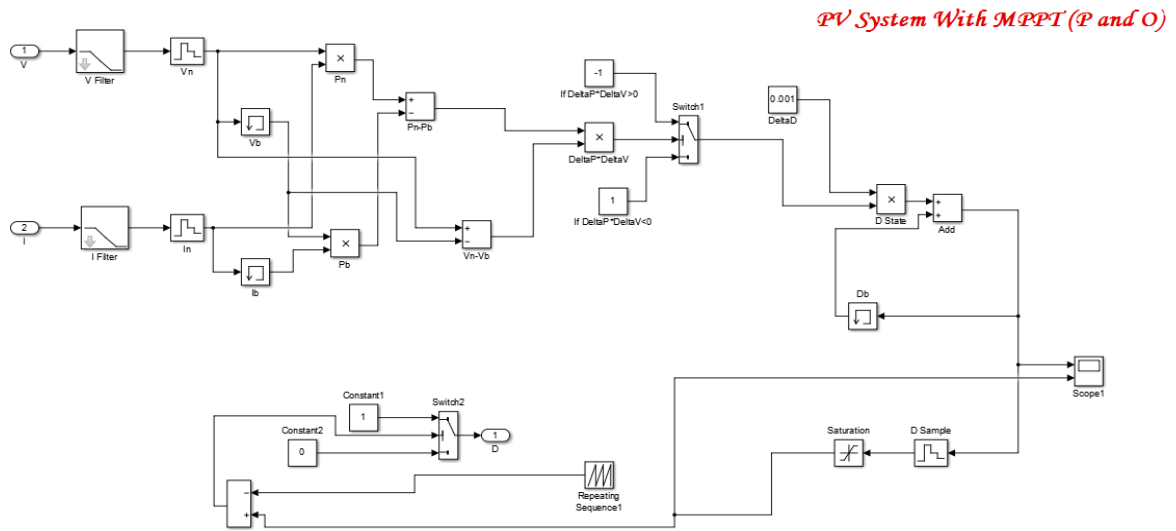


Figure (III.14) : Schéma bloc de la commande MPPT P&O.

III.3. Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque :

Le modèle de la chaîne de conversion photovoltaïque réalisé sous Matlab/Simulink est représenté par la figure (III.15) :

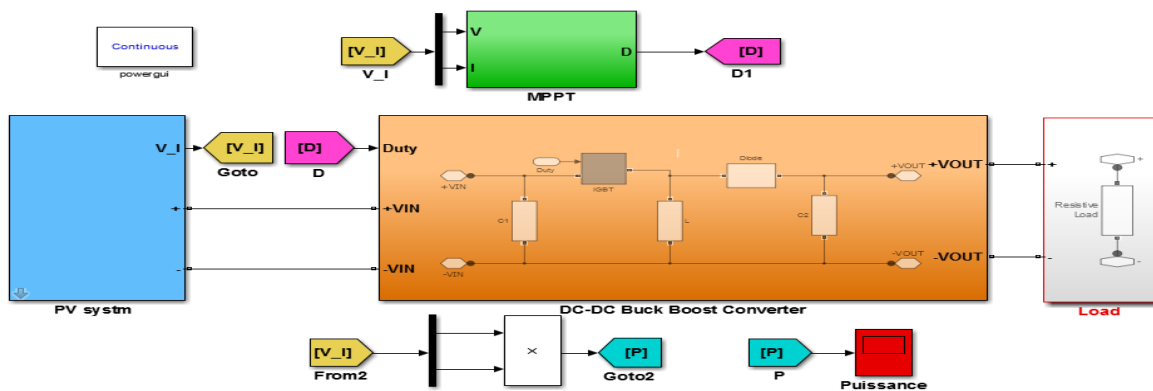


Figure (III.15) : Chaîne de conversion photovoltaïque (PV+ convertisseur DC-DC + charge).

Les figures (III.16), (III.17), (III.18) et (III.19) présentent le courant et tension ainsi que la puissance à la sortie de la charge et du panneau.

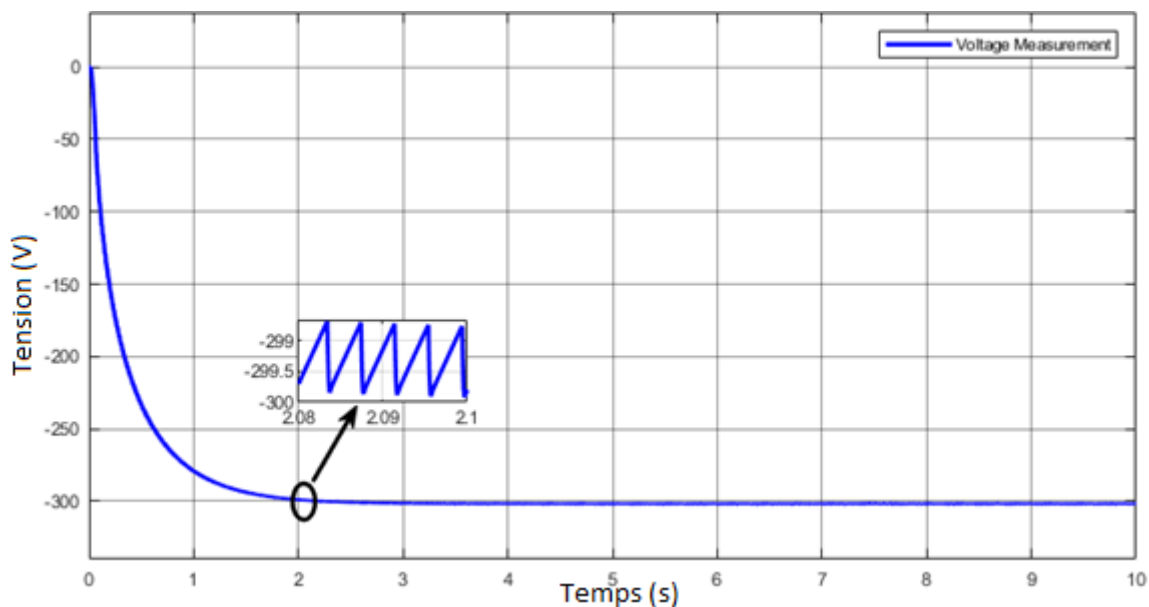


Figure (III.16) : Résultats de simulation de tension à la sortie de la charge pour

$$G = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ et } T = 25^\circ\text{C}$$

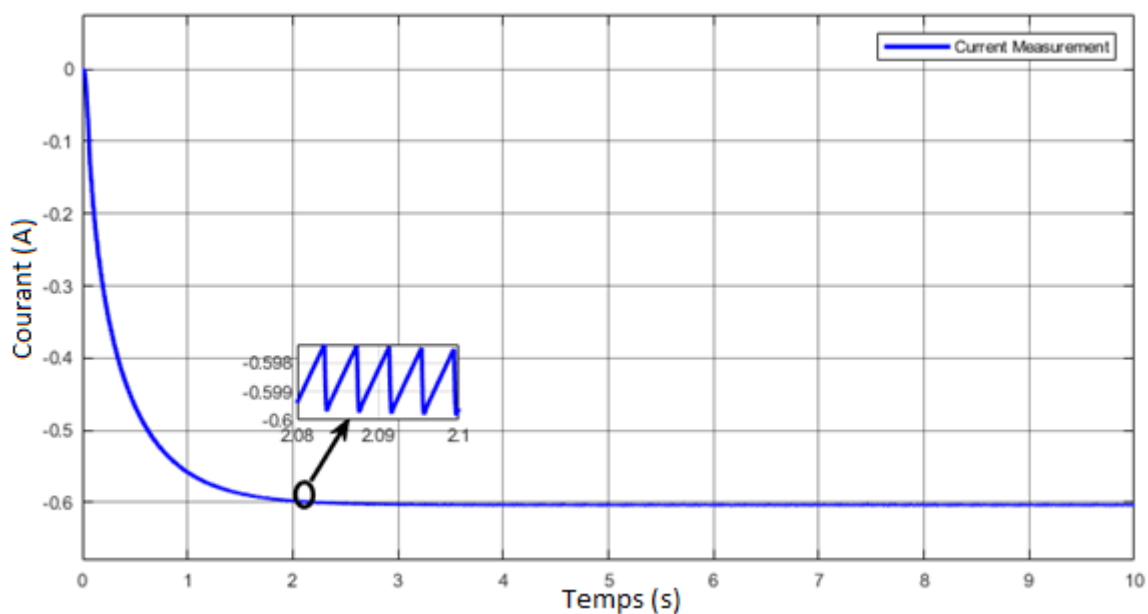


Figure (III.17) : Résultats de simulation de courant à la sortie de la charge pour

$$G = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ et } T = 25^\circ\text{C}$$

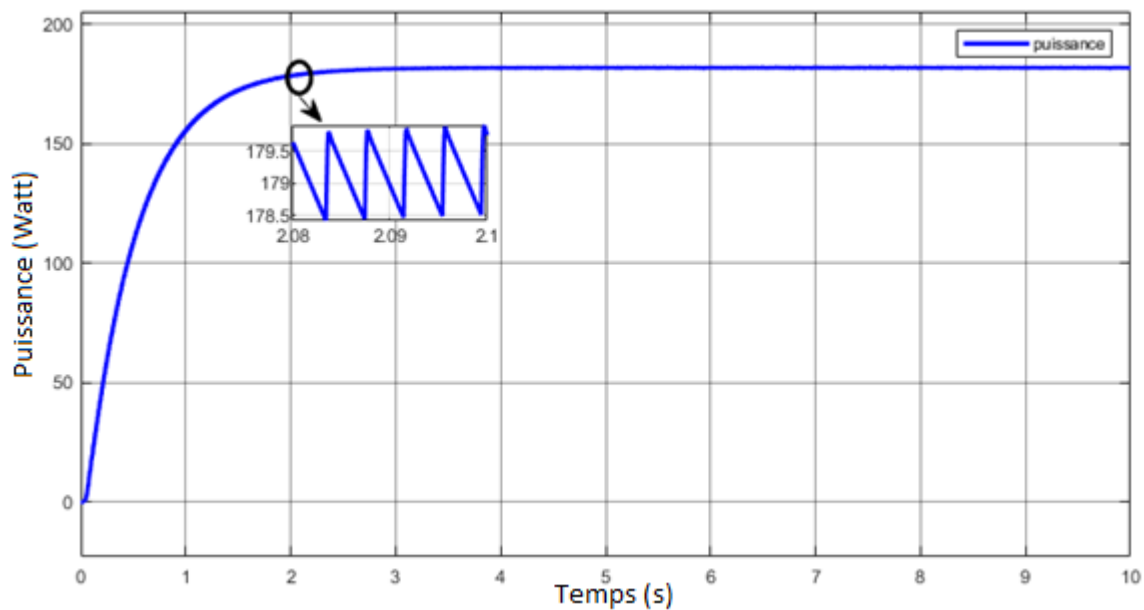


Figure (III.18) : la puissance de sortie de la charge pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$

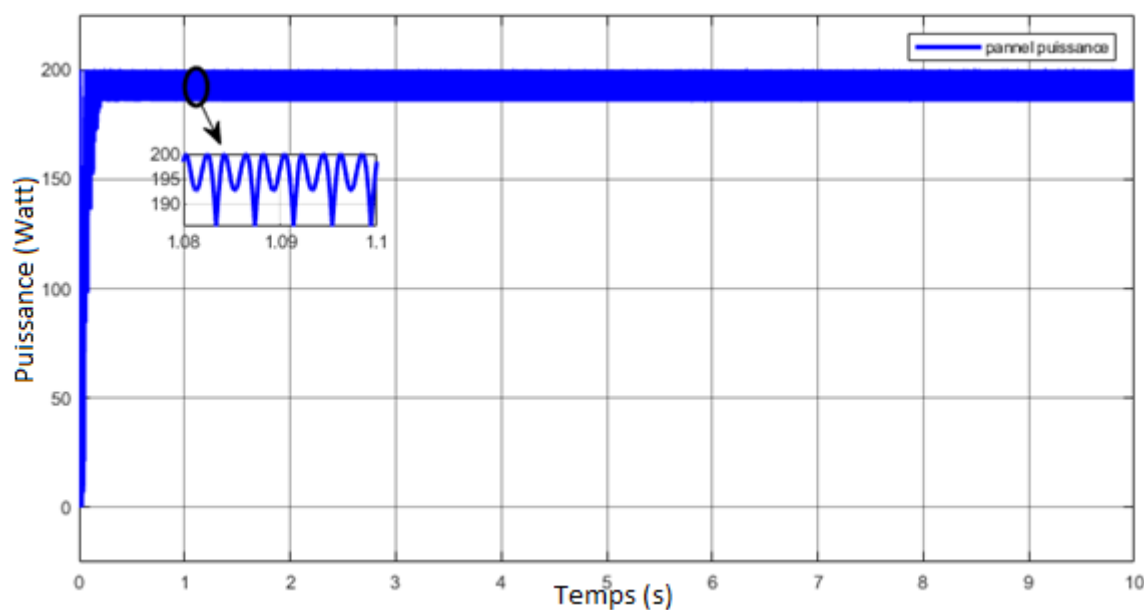


Figure (III.19) : la puissance de sortie du panneau pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.

Dans les conditions standards la puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 200 W et celle fournie par la charge autour de 180 W. De même on remarque que la tension a augmenté. On peut dire que la puissance maximale est presque atteinte avec quelques pertes d'énergie à cause des oscillations importantes que fait le point de fonctionnement autour du PPM.

III.3.1. Simulation de la chaine pour différentes valeurs d'éclairement et de température :

La figure (III.20) présente la puissance à la sortie de la charge ainsi qu'à la sortie du panneau pour des valeurs d'éclairement de 200W/m^2 , 400W/m^2 , 600W/m^2 , 800W/m^2 , 1000W/m^2 . Tandis que la figure (III.21) donne la puissance à la sortie de la charge pour des valeurs de température égales à 25°C , 30°C , 35°C .

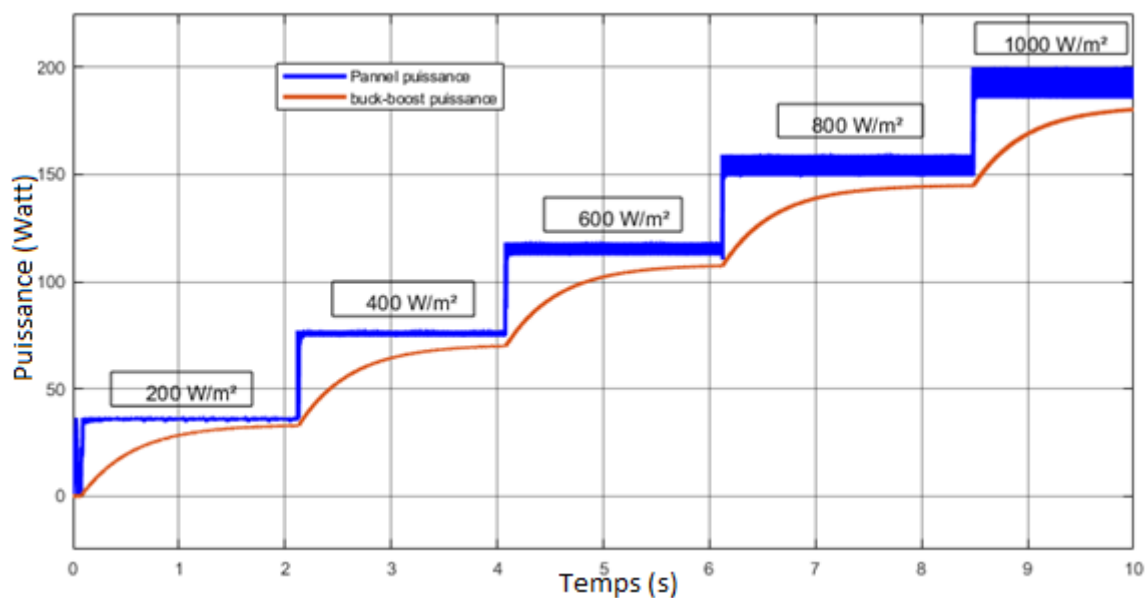


Figure (III.20) : La puissance de la sortie de la charge et du panneau pour différentes valeurs d'éclairement.

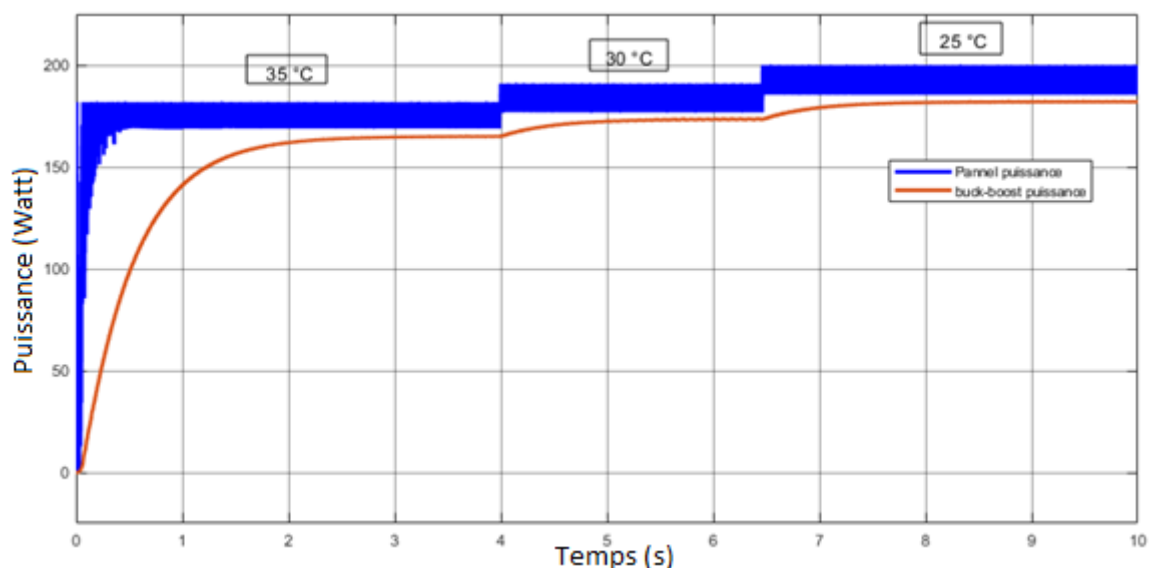


Figure (III.21) : La puissance de la sortie de la charge et du panneau pour différentes valeurs de température.

On note qu'en variant la température et l'éclairement, la puissance reste au maximum. Aussi, les meilleures conditions où le panneau à un meilleur rendement sont les conditions standards (1000 W/m² et 25°C). On constate alors que le modèle du convertisseur proposé permet effectivement d'optimiser la production du générateur photovoltaïque donc notre simulation est validée et justifiée c'est-à-dire la commande MPPT adapte le générateur photovoltaïque à la charge (le transfert de la puissance maximale fournie par le GPV).

III.4. Structure de la chaine de conversion éolienne :

Dans cette partie l'étude d'une chaine de production éolienne est abordée. Chaque élément de cette chaine est modélisé en vue d'une simulation globale du système. La chaine éolienne proposée dans cette partie est formée (figure (III.22)) d'une turbine, d'une génératrice synchrone à aimant permanent, d'un redresseur à diode, d'un hacheur Buck-Boost et d'une charge [4].

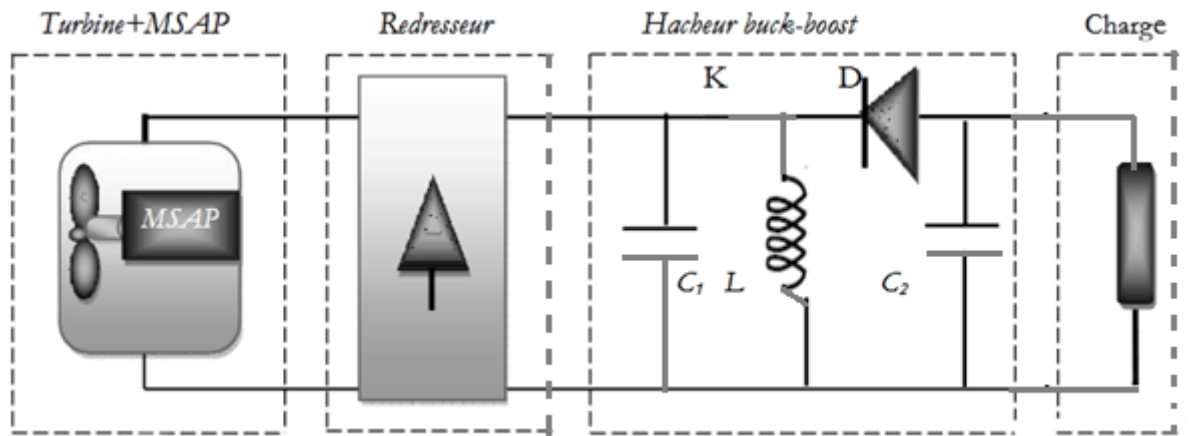


Figure (III.22) : Eléments de la chaine éolienne [4].

III.4.1. Modélisation du vent :

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent sera modélisée par une somme de plusieurs harmoniques [5].

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \tag{III.14}$$

Où :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent .

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre K

w_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre K

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

III.4.2. Modèle de la turbine :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Grâce à l'énergie cinétique, les particules de la masse d'air en mouvement passent par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [6] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (\text{III.15})$$

$$S = \pi R^2 \quad (\text{III.16})$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air (Kg/m³).

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

Ω_T : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine (rad/s).

S : la surface balayée par le rotor (balayée par les pales) (m²).

R : le rayon du rotor de la turbine à vent (m).

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 fournie par la limite de Betz [7] :

$$P_{max} = \frac{19}{27} P_v = 0.59 P_v \quad (\text{III.17})$$

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% [11] de l'énergie cinétique de la masse d'air qui la traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho S V_v^3} = 0.59 \quad (\text{III.18})$$

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

$$C_p = \frac{2.P_{eol}}{\rho S V_v^3} \quad (\text{III.19})$$

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_v} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

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

Selon la caractéristique propre de la voilure $C_p(\lambda)$ de l'équation (III.19) la puissance éolienne est calculée ainsi :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S V_v^3 \quad (\text{III.21})$$

La caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure est représentée par un polynôme de troisième degré sous la forme :

$$C_p(\lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\lambda i^{-21}} \quad (\text{III.22})$$

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^{3+1}} \quad (\text{III.23})$$

La figure (III.23) présente le tracé des caractéristiques de turbines éoliennes :

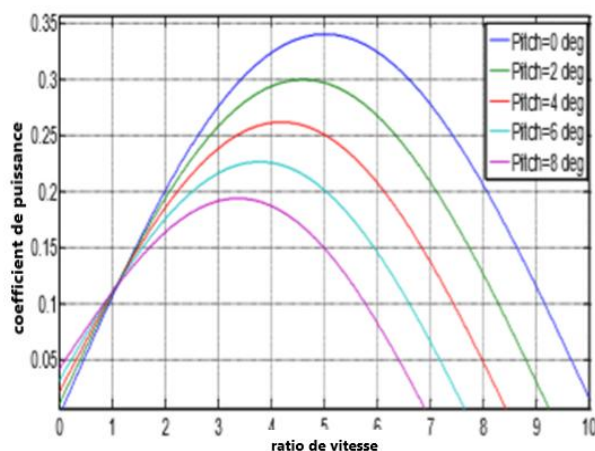


Figure (III.23) : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ .

III.4.3. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [6] :

$$G = \frac{C_t}{C_{mec}} \quad (\text{III.24})$$

$$G = \frac{\Omega_r}{\Omega_t} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

G : Rapport de multiplication.

C_t : Couple mécanique de la turbine éolienne [N.m],

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe de la génératrice [N.m],

Ω_r : Vitesse de la génératrice (arbre rapide en rd/s),

Ω_t : Vitesse de rotation des pales (arbre lent en rd/s).

La modélisation de la transmission mécanique se résume comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f \cdot \Omega_r \quad (III.26)$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes [kg.m²],

f: Coefficient de frottement visqueux,

C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice [N.m].

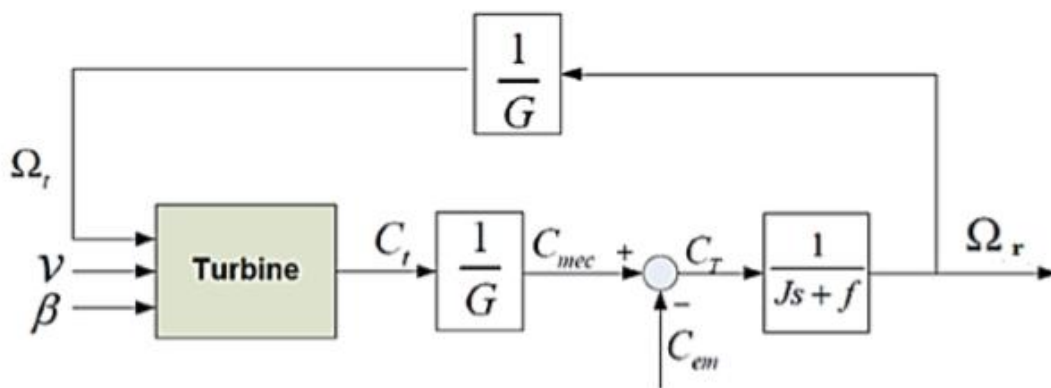


Figure (III.24) : Turbine connecté au modèle de multiplicateur de vitesse et au modèle de l'arbre.

III.4.4. Modélisation de la génératrice :

La génératrice synchrone à aimants permanents est également simulée. On se base sur des hypothèses simplificatrices suivantes.

III.4.4.1. Hypothèses simplificatrices :

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices :

- ❖ L'absence de la saturation dans le circuit magnétique.
- ❖ La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice, créée par les enroulements au stator.
- ❖ L'effet des encoches est négligé.
- ❖ L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés.
- ❖ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator.

L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air [8].

III.4.4.2. Mise en équations électriques et magnétiques dans repère (a b c) :

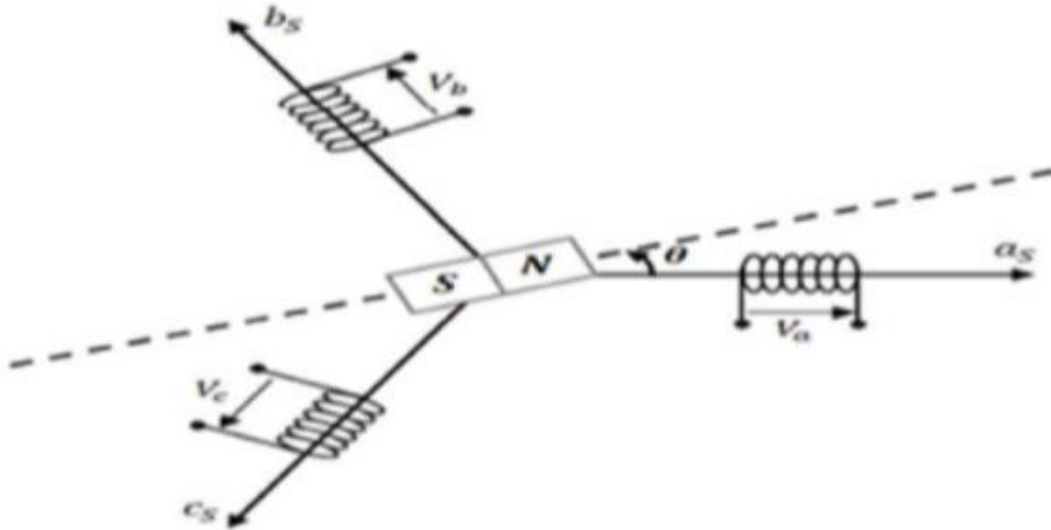


Figure (III.25) : schéma de la MSAP dans le repère (a, b, c).

Au stator : trois enroulements a, b, c électriques sont décalés entre eux de $2\pi/3$.

Au rotor : un inducteur à aimant permanent [9].

a) Equation électrique :

En régime permanent, le courant d'excitation est directement proportionnel à la tension d'excitation (car le flux Φ_{est} est constant) :

- Au stator :

$$[v_s] = R[i_s] + \frac{d}{dt} ([\Phi_s]) \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} v_{s1} = R i_{s1} + \frac{d\Phi_{s1}}{dt} \\ v_{s2} = R i_{s2} + \frac{d\Phi_{s2}}{dt} \\ v_{s3} = R i_{s3} + \frac{d\Phi_{s3}}{dt} \end{cases} \quad (III.27)$$

Avec :

$$[\Phi_s] = ([L_s][i_s]) + [\Phi_{fs}(\theta)] \quad (III.28)$$

$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix}$, les tensions simples d'alimentation du stator.

$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix}$, les courants dans l'enroulement triphasé du stator.

b) Equation des flux :

$$[\Phi_s] = [L_s] + [L_{s2}(\theta)] \quad (III.29)$$

Où :

$L_s = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}$, la matrice des inductances et des inductances mutuelles.

Avec l_s est l'inductance propre d'une phase. Alors que m_s est l'inductance mutuelle entre deux phases du stator.

θ : la distance angulaire que fait le pôle nord de la roue polaire avec l'axe de la phase i de l'armature fixe

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.30)$$

$$M_{sf} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.31)$$

$[M_{sf}]$: La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

c) Equation mécanique :

L'équation mécanique est exprimée comme suit [9] :

$$J \frac{\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_{em} - C_r \quad (III.32)$$

Avec :

J : moment d'inertie.

Cem : couple électromagnétique.

Cr : couple résistant.

f : Coefficient de frottement visqueux.

Ω_{mec} : vitesse angulaire mécanique rotorique.

III.4.4.3. Mise en équations électriques et magnétiques dans le repère de Park :

Il existe plusieurs transformations ayant pour objectif la simplification des équations de la machine en les rendant plus facile à résoudre numériquement. Parmi ces transformations, la transformée de Park qui consiste à remplacer les enroulements triphasés (a b c) par deux enroulement d et q figure (III.26) [9].

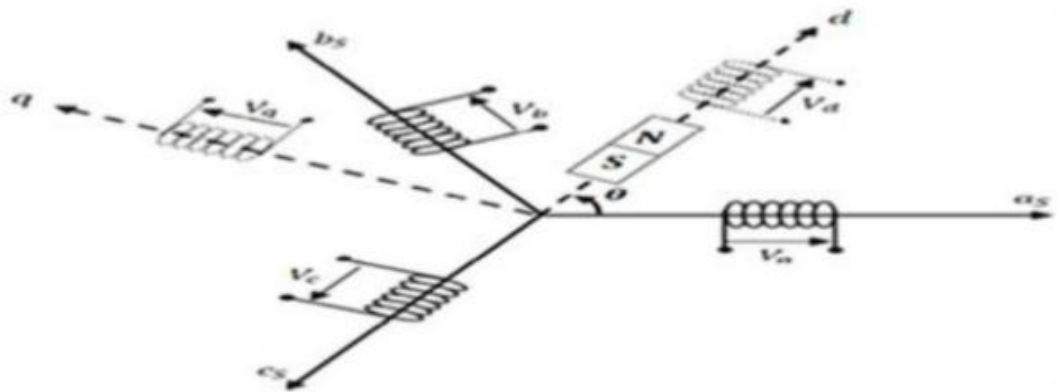


Figure (III.26) : Schéma de la MSAP dans le repère (d q).

$$V_{abc} = [P(\theta)] [V_{dq}] \tag{III.33}$$

$$[V_{dq}] = [P(\theta)]^{-1} [V_{abc}] \tag{III.34}$$

Avec :

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$: sont les matrices de passage direct et inverse.

$$\begin{bmatrix} xsd \\ xsq \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} xs1 \\ xs2 \\ xs3 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

x peut être une des grandeurs sinusoïdales du stator. La transformée inverse depuis le repère diphasé vers le repère triphasé sera donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} xs1 \\ xs2 \\ xs3 \end{bmatrix} = P^T(\theta) \begin{bmatrix} xsd \\ xsq \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

Appliquons cette transformation au système d'équation de la MS

$$P^T(\theta)[v_{dq}] = R * P^T(\theta)[i_{dq}] + L_s \frac{d}{dt}(P^T(\theta)[i_{dq}]) - P^T(\theta)[e_{dq}(\theta)] \quad (\text{III.37})$$

On multiplie les deux membres de l'équation par $P(\theta)$, on aura :

$$[v_{dq}] = R * [i_{dq}] + L_s * P(\theta) \frac{d}{dt}(P^T(\theta)[i_{dq}]) + L_s \frac{d}{dt}(i_{dq}) - [e_{dq}(\theta)] \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$$P(\theta) \frac{d}{dt}(P^T(\theta)) = -w_s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

Et :

$$e_{dq}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} w_s M_{max} \begin{bmatrix} \sin(p\theta) \\ \sin(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} w_s M_{max} \end{bmatrix} \quad (\text{III.40})$$

Ainsi, le système d'équation au stator de la MS devient en supposant $\sqrt{\frac{2}{3}} M_{max} = M_f$

$$\begin{cases} V_d = R i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - L_s w_s i_q \\ V_q = R i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + L_s w_s i_d + M_f w_s J \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Lorsque la machine synchrone est à aimant permanent, on pose $M_f J = \Phi_f$

$$\begin{cases} V_d = R i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - L_s w_s i_q \\ V_q = R i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + L_s w_s i_d + w_s \Phi_f \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

D'autre part :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_s * i_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_s * i_q \end{cases} \quad (III.43)$$

Et le système d'équation au stator de la MS devient :

$$\begin{cases} V_d = R i_d + L_s \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega_s \Phi_q \\ V_q = R i_q + L_s \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega_s \Phi_d \end{cases} \quad (III.44)$$

La puissance instantanée mise en jeu par le moteur est :

$$p(t) = v_{s1}i_{s1} + v_{s2}i_{s2} + v_{s3}i_{s3} \quad (III.45)$$

En utilisant la transformé de PARK, on obtient :

$$p(t) = v_d i_d + v_q i_q \quad (III.46)$$

Par substitution, on aboutit à:

$$p(t) = R(i_d^2 + i_q^2) + \left(\frac{d\Phi_d}{dt} i_d + \frac{d\Phi_q}{dt} i_q\right) + \omega_s (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (III.47)$$

$R(i_d^2 + i_q^2)$: représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.

$\left(\frac{d\Phi_d}{dt} i_d + \frac{d\Phi_q}{dt} i_q\right)$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator. Cette puissance est nulle en régime permanent.

$\omega_s (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d)$: représente la puissance électromagnétique. Elle peut être écrite sous la forme :

$$P_e = p \frac{d\theta}{dt} (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (III.48)$$

On obtient le couple électromagnétique par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du champ tournant comme suit :

$$dE_e = P_e dt = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) d\theta \quad (III.49)$$

$$T_e = \frac{dE_e}{d\theta} = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (III.50)$$

Utilisons la transformation de LAPLACE pour les équations générales dans le plan de PARK régissant la MS en régime transitoire :

Equation électrique au stator :

$$\begin{cases} V_d(s) = (R + L_s S)I_d(s) - L_s \omega_s I_q(s) \\ V_q(s) = (R + L_s S)I_q(s) - L_s \omega_s I_d(s) + p \Phi_f \Omega(s) \end{cases} \quad (III.51)$$

Donc :

$$\begin{cases} V_d(s) = (R + L_s S)I_d(s) - \omega_s \Phi_q(s) \\ V_q(s) = (R + L_s S)I_q(s) + \omega_s \Phi_d(s) \end{cases} \quad (III.52)$$

L'équation mécanique :

$$T_e(s) - T_r(s) = (f + Js)\Omega(s) \quad (III.53)$$

Avec :

$$T_e = p(\Phi_d(s)i_q(s) - \Phi_q(s)i_d(s)) \quad (III.54)$$

Et :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d I_d + \Phi_r \\ \Phi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (III.55)$$

III.4.5. Modèle du redresseur à diode :

Le redresseur est un convertisseur « alternatif/continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant à partir d'une source alternative, il est représenté par la figure (III.27) [10] :

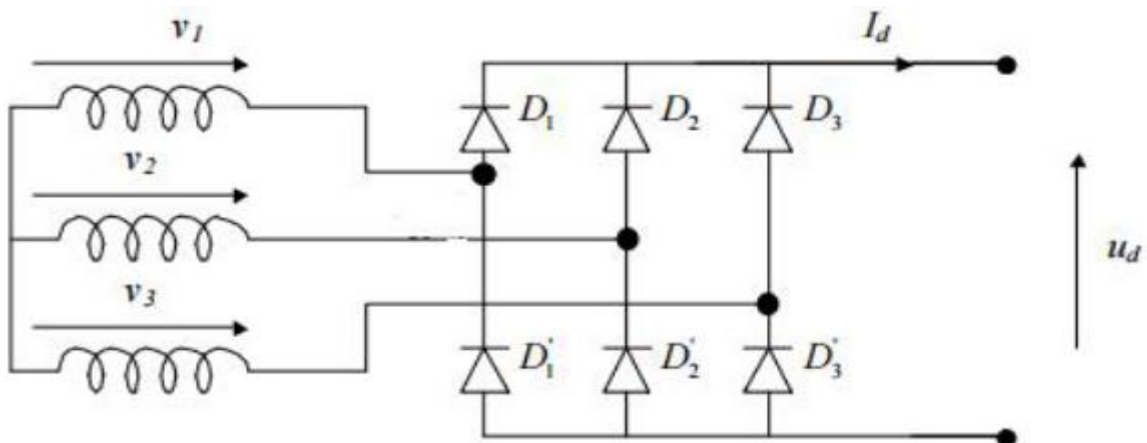


Figure (III.27) : Représentation d'un redresseur triphasé à diodes double alternance [10].

Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D2, D3) à cathode comme assurant l'aller du courant I_d et trois diodes (D4, D5, D6) à anode comme assurant le retour du courant I_d . Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé de tension équilibré [10] :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\omega t) \\ V_2 = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.56)$$

Et si on néglige d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$u_d(t) = \max[V_1(t), V_2(t), V_3(t)] - \min[V_1(t), V_2(t), V_3(t)] \quad (III.57)$$

III.5. Modèle d'une éolienne sous Matlab :

La figure (III.28) représente le système éolien constitué d'une turbine entrainant une machine synchrone à aimant permanent à une vitesse de vent de 12m/s et un redresseur PD3. Cette éolienne produit une puissance de 3000 watt avec cette vitesse de vent.

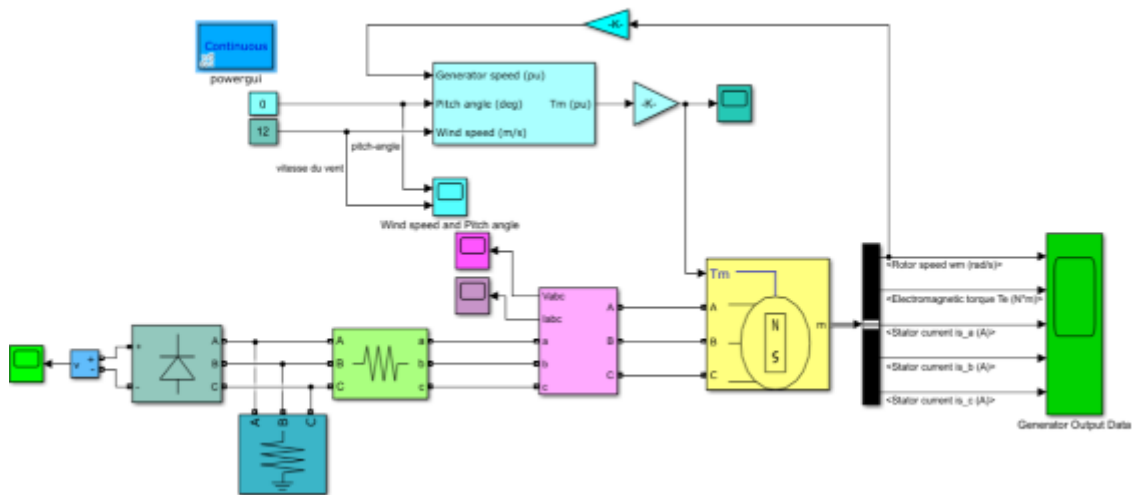


Figure (III.28) : Modèle du système éolien sous Matlab.

III.5.1. Vitesse de vent :

La figure (III.29) représente l'allure de la variation de la vitesse en fonction du temps ainsi que l'angle de calage, et comme on a suggéré que la vitesse du vent est fixe à la valeur 12m/s, on a délivré un signal constant à la valeur susmentionné.

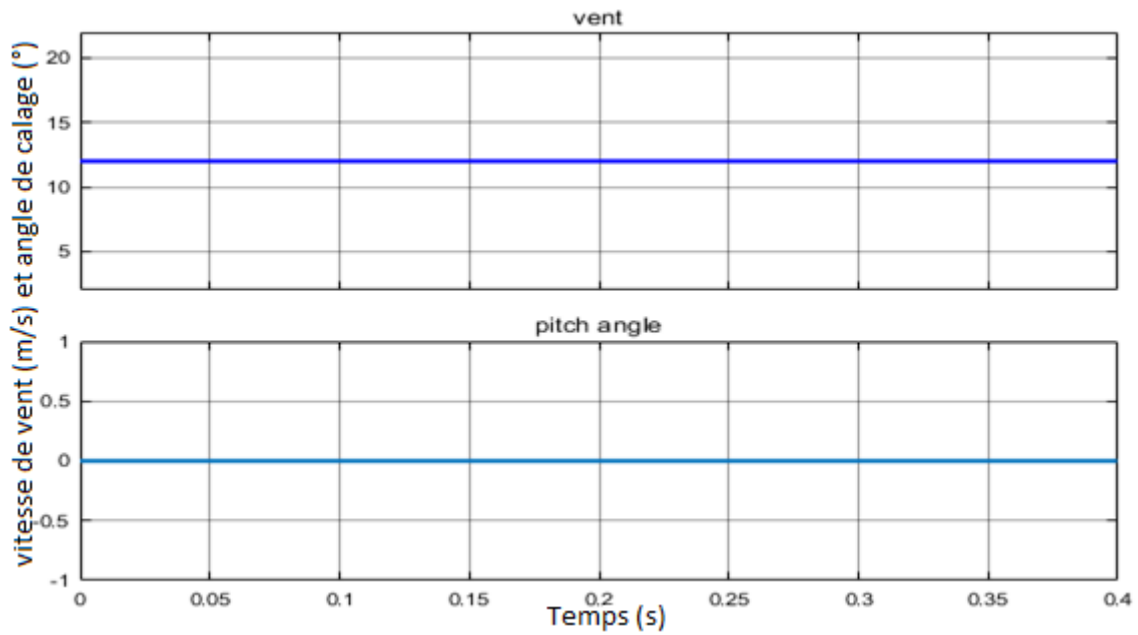


Figure (III.29) : Vitesse de vent et angle de calage.

III.5.2. Tensions et courants générés :

La figure (III.30) montre les tensions statoriques générés par la machine synchrone à aimants permanents tout en maintenant, une vitesse de vent fixe égale à 12 m/s.

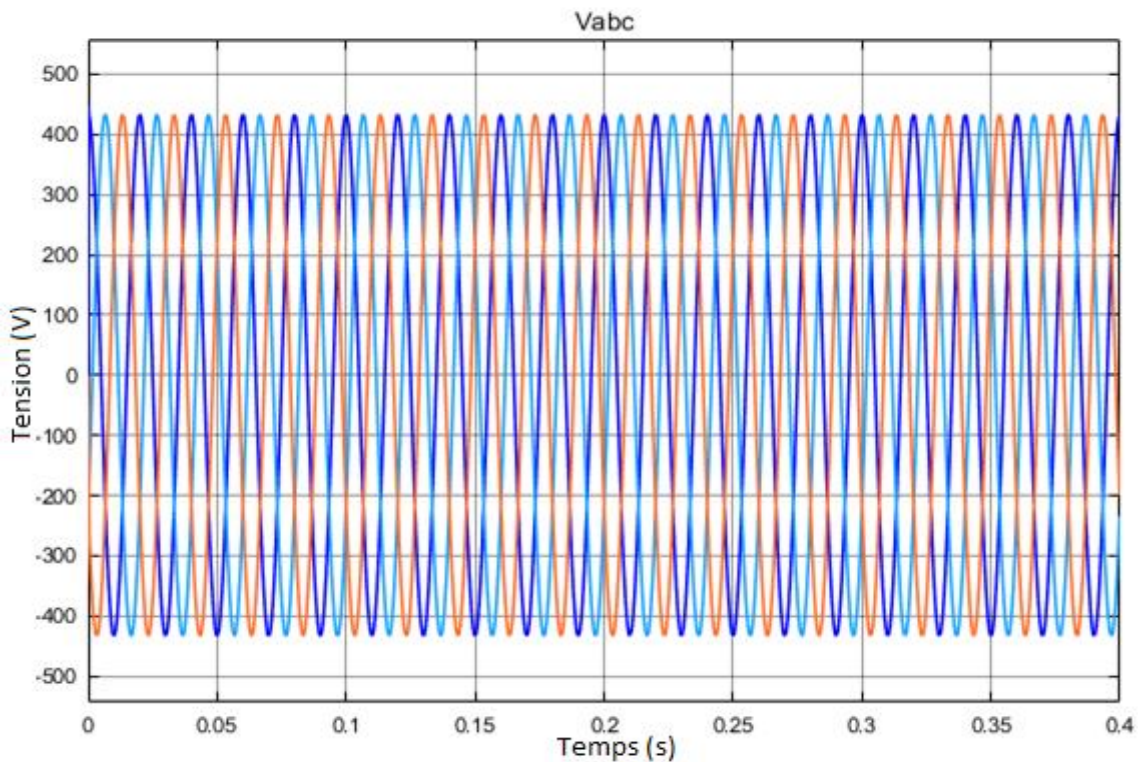


Figure (III.30) : Tensions générés V_{abc} .

On constate que les tensions générées ont une forme sinusoïdale et atteignent une valeur de 400V, cette tension reste constante au fil du temps.

Les courants statoriques générés par la machine sont représentés sur la figure (III.31).

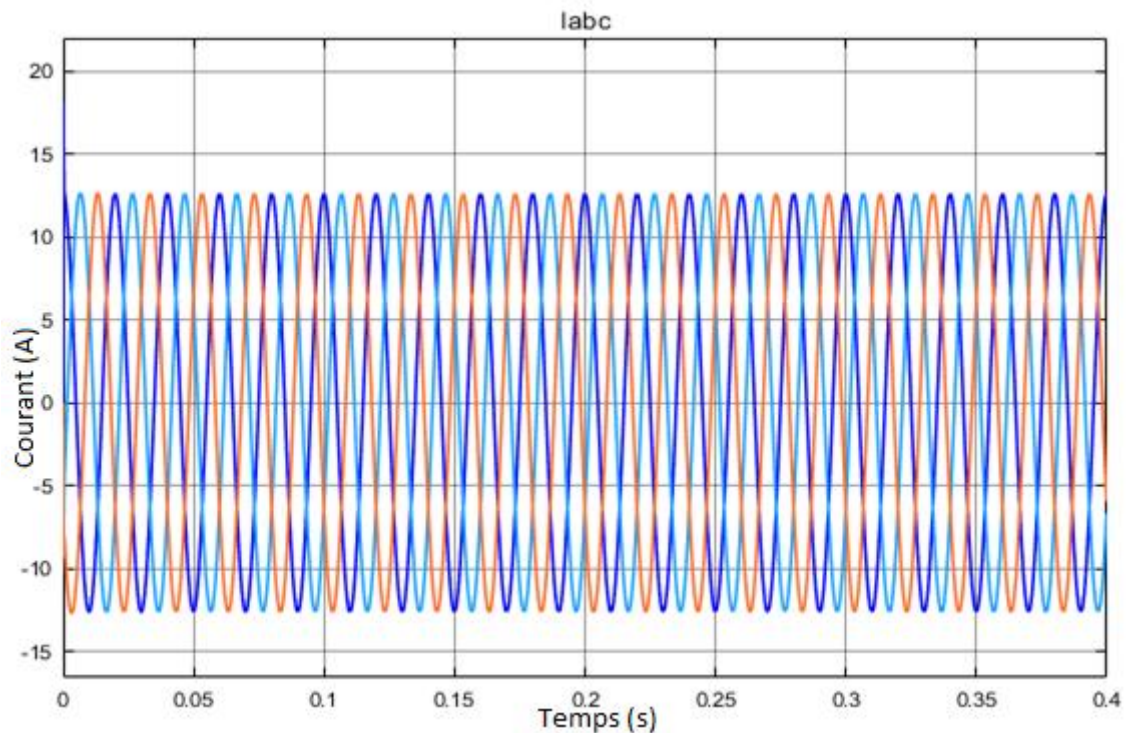


Figure (III.31) : Courants statoriques Iabc.

On remarque que l'allure des courants statoriques a une forme sinusoïdale et ils ont une valeur stable égale à 12 A.

La figure (III.32) représente la tension redressée à la sortie du redresseur à diode PD3.

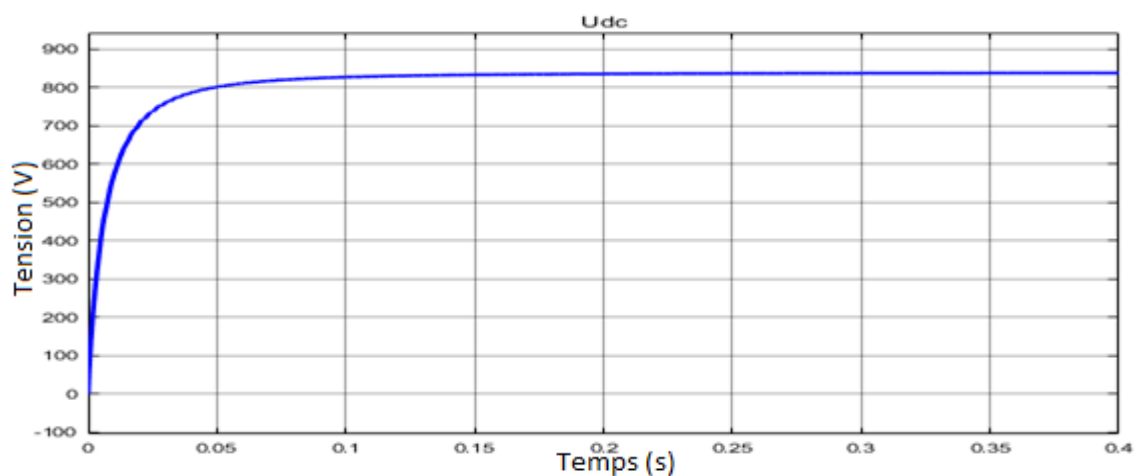


Figure (III.32) : Tension redressé Udc.

D'après la figure (III.32), on remarque qu'on a une tension continue redressée de plus de 800V à partir d'une tension alternative. Ceci prouve le fonctionnement du redresseur.

III.6. Simulation de la chaîne de conversion éolienne :

La figure (III.33) représente le système global de la chaîne de conversion éolienne composé d'une turbine éolienne, d'une machine synchrone à aliments permanents, d'un redresseur à diode, d'un convertisseur dévolteur-survolteur commandé avec MPPT pour alimenter une charge.

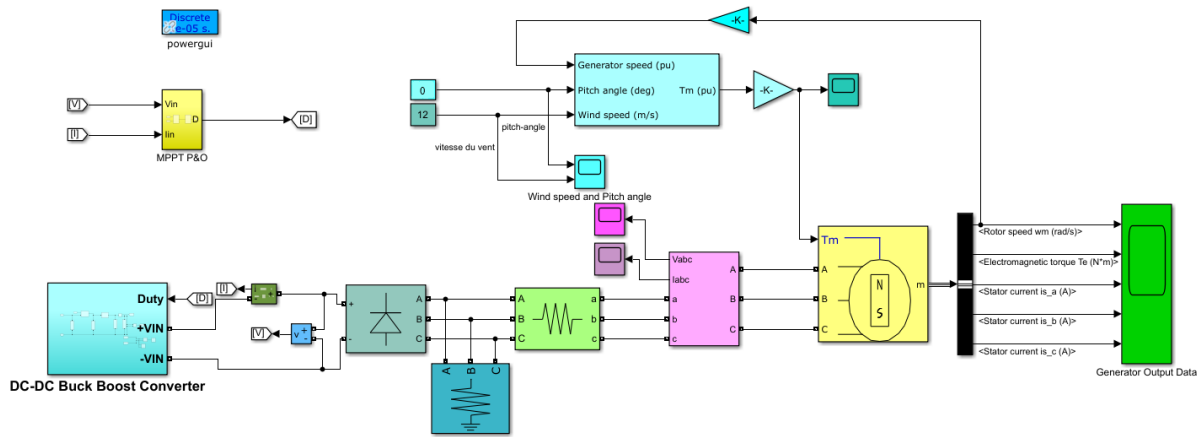


Figure (III.33) : Chaîne de conversion éolienne.

Les figures (III.34), (III.35), (III.6), représentent respectivement le courant, la tension ainsi que la puissance délivrée par le système éolien et le Buck-Boost à la charge.

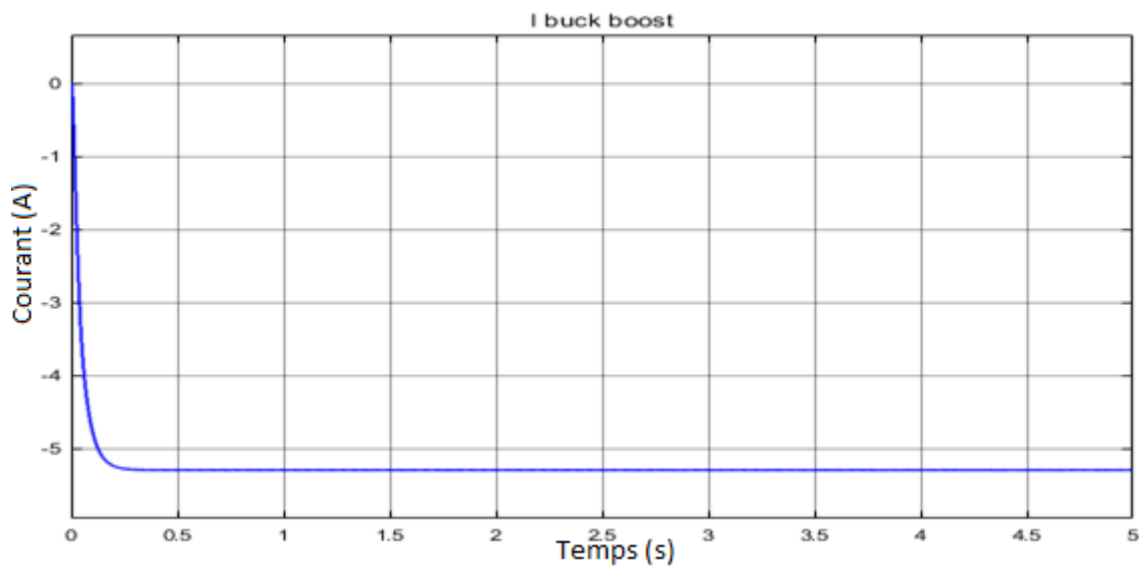


Figure (III.34) : Résultats de simulations du courant à la sortie de la charge pour une vitesse de vent de 12 m/s.

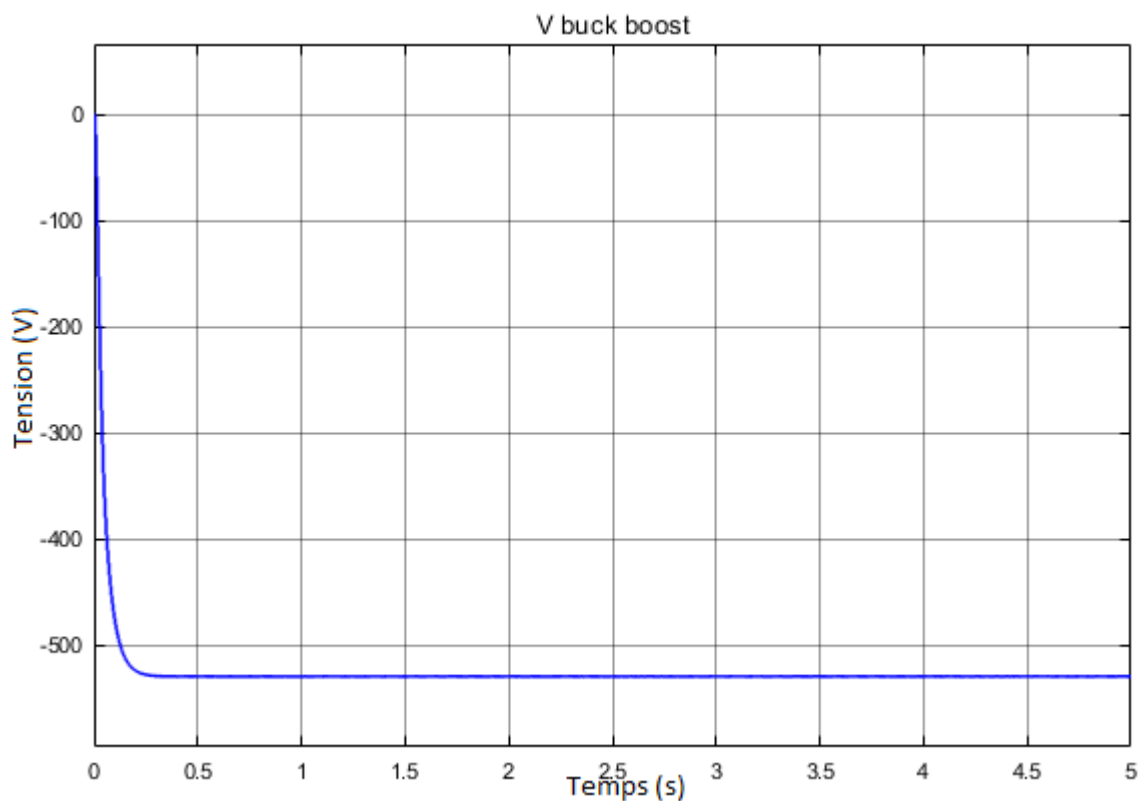


Figure (III.35) : Résultats di simulation de la tension à la sortie de la charge pour une vitesse de vent de 12 m/s

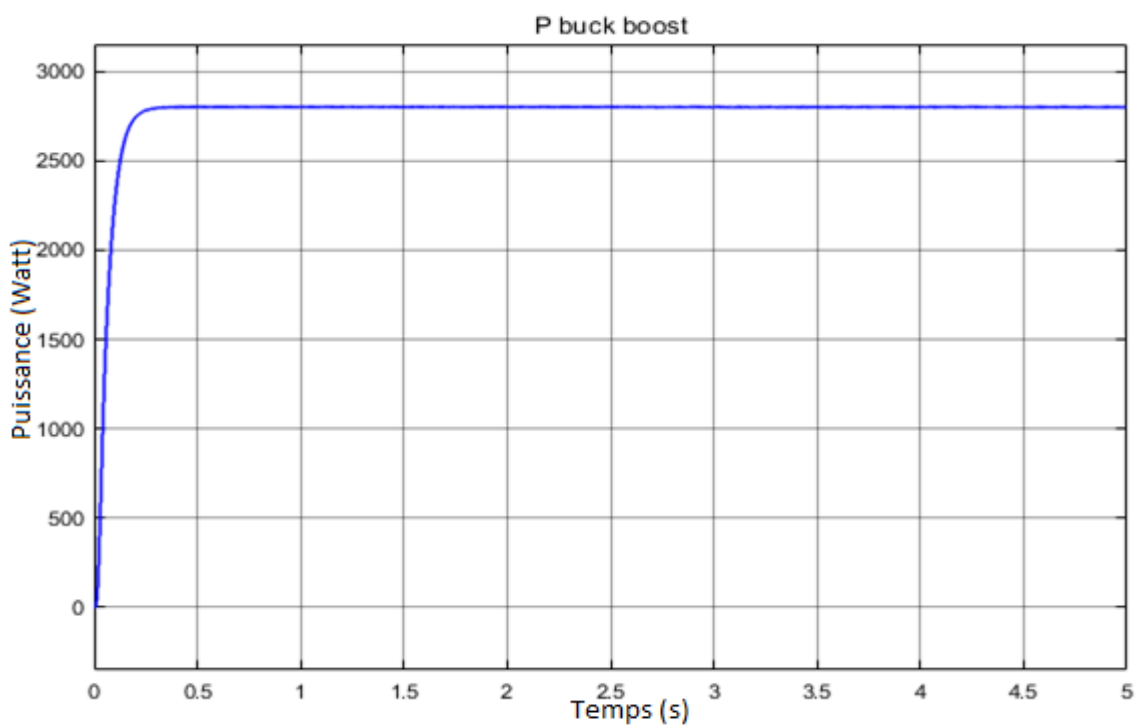


Figure (III.36) : Résultats de simulations de la puissance à la sortie de la charge pour une vitesse de vent de 12 m/s.

Les résultats indiquent que pour une puissance éolienne égale à 3000 watts, la puissance à la sortie de la charge est égale à 2800 watt, la tension est de 529 V avec un courant de 5.29 A. Donc on peut dire que le convertisseur Buck-Boost et la commande MPPT ont adapté le courant et la tension de telle sorte que la puissance maximale est presque égale à la puissance éolienne avec quelques pertes d'énergie dues aux oscillations que fait le point de fonctionnement autour du PPM. Nous pouvons conclure que le convertisseur Buck-Boost optimise la production de l'éolienne. De ce fait, notre système est validé puisque le transfert de puissance est maximal.

III.7. Conclusion :

Ce chapitre a concerné la modélisation des différents constituants de deux systèmes ; panneau photovoltaïque et turbine éolienne. La simulation des deux systèmes photovoltaïque et éolien associés à un convertisseur Buck-Boost a été réalisée. Le convertisseur Buck-Boost et la commande MPPT P&O ont pour rôle d'alimenter une charge. Nous avons constaté également que le convertisseur Buck-Boost et la commande MPPT optimisent la puissance délivrée par les deux énergies renouvelables considérées même dans des conditions variables.

Référence :

- [1] : B.Rahmani, Z.Menai, « Hybridation des énergies renouvelables utilisant des convertisseurs DC-DC et DC-AC pour l'alimentation d'une charge autonome », mémoire de Master, université Tahri Mohamed **Béchar**, 2019.
- [2] : C.BERNARD, C.SEBRAO-OLIVEIRA, B.LAVAL et C.VAUDOUER « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [3] : M. Hatti, « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible », Thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 15 Juillet 2010.
- [4] : A. MAHROUGUI, S.BENHIDER, « Etude et optimisation d'un système multi source (PV-éolien-diesel) avec systèmes de stockage », mémoire de master, université Ferhat Abbas Sétif, 2019.
- [5] : N.ARAB, « Etude et modélisation de l'entraînement électrique d'un système éolien à base de la machine synchrone à aimants permanents », mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 2010.
- [6] : S.Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [7] : B.Benkhaled, « Etude et modélisation d'une chaîne de production éolienne », mémoire de Master, université de Msila, 2013.
- [8] : A.Bouhedda, « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », mémoire de Magister, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [9] : F.Mazouz, M.Korichi, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents », mémoire de Master, université Abderrahmane Mira – Bejaia 2019.
- [10] : M.Belabed, T.Benyahia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents », mémoire de Master, université Dr. Tahar Moulay de Saida, 2015.
- [11] : S.Khelladi, « Analyse et approche d'aide à la décision pour le choix d'un projet éolien », mémoire de Magister, université ABOU BAKR BELKAID Tlemcen, 2010.

CONCLUSION GENERALE

La consommation d'électricité dans le monde ne cesse pas à croître, une grande partie de cette production d'électricité provient des sources non renouvelable, c'est pourquoi l'attention du monde est tournée vers les énergies renouvelables. Parmi ces énergies l'énergie solaire et l'énergie éolienne qui ont devenu en plus en plus accessibles en termes de technique, coût et efficacité énergétique.

Ce mémoire a été réalisé dans le but d'étudier et de simuler deux différentes sources d'énergies pour alimenter une charge à l'aide d'une interface d'électronique de puissance (convertisseurs DC-DC) qui permet d'adapter les caractéristique de la source, cette interface est muni d'un algorithme de poursuite du point maximum de puissance MPPT afin d'optimiser la conversion énergétique et pour que les systèmes fonctionne à leur puissance maximale.

Dans un premier temps, nous avons donné un aperçu général sur les deux énergies solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, nous avons présenté aussi les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies et nous avons cité tous les éléments constitutifs des deux systèmes ainsi que leur principe de fonctionnement et de conversion d'énergie.

Nous avons étudié, dans un deuxième temps, quelques types de convertisseurs statiques DC-DC utilisés dans les deux systèmes étudiés (photovoltaïque et éolien) comme le convertisseur Buck (dévolteur), le convertisseur Boost (survolteur) et le convertisseur Buck-Boost (dévolteur-survolteur), ensuite nous avons présenté la commande MPPT des convertisseurs DC-DC ainsi que ces différentes méthodes tel que la méthode P&O (perturbation et observation).

Finalement nous avons modélisé et simulé avec le logiciel MATLAB/Simulink le module photovoltaïque pour tracer les caractéristiques I-V et P-V ainsi que l'influence de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du module photovoltaïque, ensuite nous avons simulé le convertisseur Buck-Boost pour vérifier sans fonctionnement abaisseur et élévateur, puis nous avons connecté tous les éléments de la chaîne de conversion photovoltaïque commandé avec la commande MPPT P&O, ces étapes sont fait aussi pour la chaîne de conversion éolienne constitué d'une turbine éolienne d'une machine synchrone à aimants permanents, d'un redresseur à diode, d'un bus continu et d'un convertisseur DC-DC pour alimenter une charge

ملخص:

إن مستقبل الطاقة الذي نتمتع به لا بد وأن يستند على الطاقة الخالية من التلوث بالاستعانة بالعديد من الموارد. إن الطاقة المتجددة تشكل الخيار الأفضل، ولكن الإنتاج متقطع.

في هذا العمل قمنا بدراسة نمذجة ومحاكاة التشغيل الكهربائي لنظامين: نظام طاقة الرياح ونظام الطاقة الكهروضوئية معدلة بواسطة أداة تحكم محددة (اضطراب وملاحظة). يضمن هذا التحكم ان كلا نظامي التشغيل يوفر اقصى قدر من استكشاف الطاقة عند استخدام محول خافض رافع للجهد. يتم الحصول على نتائج المحاكاة باستخدام برنامج ماتلاب.

كلمات مفتاحية: نمذجة، محاكاة، مولد الرياح، الخلايا الضوئية، محول خافض رافع للجهد، تتبع اقصى نقطة للطاقة، برنامج ماتلاب

Abstract :

Our energy future may be based on no pollution and rich energy resource. Renewable energy is the best option, but with intermittent production.

In this work, we study modeling and simulation of electrical functioning of two systems based on wind and photovoltaic energies. These systems are adjusted by a specific MPPT control (disturbance and observation). This command ensures both operating systems to provide a maximum power tracking from the use of a Buck-Boost converter. The simulation results are obtained thanks of MATLAB/Simulink software.

Key words : modeling, simulation, wind generator, photovoltaic cells, Buck-Boost converter, maximum power point tracking (MPPT), MATLAB software.

Résumé :

Notre avenir énergétique peut être basé sur une énergie sans pollution et dotée de nombreuses ressources. L'énergie renouvelable est la meilleure option, mais avec une production intermittente.

Dans ce travail, nous avons étudié la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique de deux systèmes ; éolien et photovoltaïque, ajustés par une commande MPPT spécifique (perturbation et observation). Cette commande garantit que les deux systèmes d'utilisation fournissent une puissance maximale à partir d'un convertisseur Buck-boost. Les résultats de simulation sont obtenus sous MATLAB/Simulink.

Mots clés : modélisation, simulation, aérogénérateur, cellules photovoltaïque, convertisseur Buck-Boost, poursuite de point maximum de puissance (MPPT), logiciel MATLAB.

