

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draya - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département SCIENCES DE LA MATIERE



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en physique
énergétique

Thème

Etude de développement d'un simulateur d'installation électrique

Soutenu le 2020

Présenté par :

- BOUHAMDI SOUAD
- ABELLAH ZAHRA

Encadré par:	SAYHI Mostefa	Maitre de conférence	Univ. Adrar
Co encadré par:	SLIMANI Abdeljalil	Maitre de conférences B	URERMS/CDER
Examineur :	1-OMARI Boumeddiene	Maitre assistant A	Univ. Adrar
	2-HADJAJ Kassim	Maitre assistant	Univ. Adrar

Année Universitaire: 2019/2020

Résumé

Les installations électriques se diffèrent par leurs compositions et destinations et sont appelées à évoluer et à répondre aux exigences accrues des utilisations actuelles. De ce fait, la mise sur pied d'une installation électrique type; peut engendrer des imprévus opérationnels et par conséquent des dysfonctions. La simulation demeure un outil considérable, intervenant en amont ainsi qu'en aval, permettant de contourner les dysfonctions éventuelles et constituant, par ailleurs, un outil de diagnostic et d'aide à la prise de décision

Mots clés : photovoltaïque, MPPT, convertisseur, éolienne

Abstract


The electrical installations differ in their compositions and destinations and are called to evolve and to respond to the increased requirements of current use. As a result, the setting of a typical electrical installation can produce an unpredicted operating and therefore a probable dysfunction. The simulation remains a significant tool which can occur beforehand as well as afterwards, allowing to bypass the likely dysfunctions and constitute, on the other hand, a diagnostic and a decision-making tool.

Key words: Photovoltaic, MPPT, converter, wind.

المخلص

تختلف التركيبات الكهربائية في تكوينها ووجهتها وهي مدعوة للتطور والاستجابة للمتطلبات المتزايدة للاستخدام الحالي. ونتيجة لذلك، فإن انشاء تركيب كهربائي معين قد يتمخض عن طوارئ أثناء الاستغلال وبالتالي عيوب تشغيلية. تكتسي المحاكات أهمية كبيرة كأداة تستعمل سواء في البداية أو في النهاية من شأنها تخطي عيوب التشغيل المحتملة كما تعتبر من جهة أخرى أداة تشخيص ومساعدة على اتخاذ القرارات.

كلمات مفتاحية: طاقة شمسية، محول، طاقة الرياح



Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à

Mes très chers parents:

*Ma mère: **Zahra** et mon père: **Abdellah***

Mes sœurs :


Kadidja , Mabrouka, Safia , Mina,

Daouia, Halima

À tous mes collègues de:

** promotion. Phys. énergétique 2019*

BOUHAMDI SOUAD

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The roses are in shades of white and red, with green leaves and buds. The pearls are arranged in a grid-like pattern, with larger pearls at the corners and smaller ones in between.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

• Mes chers parents Abellah Ahemad & Abbassi Fatima :

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense

Amour que je leurs porte, ni la profonde gratitude que je leurs témoignes pour tous les sacrifices qu'ils n'ont jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. J'espère avoir répondu aux espoirs qu'ils ont fondé en moi, et que ce modeste travail soit l'exaucement de leurs vœux. • Mes grands-parents qui m'ont accompagnés par leurs prières et leurs douceurs,

puisse Dieu leurs prêter une longue vie et beaucoup de santé et de bonheur. • A tous mes sœurs & frères

Amina ;Khadidja ;Hafsa ; Abd

eloihab ;samiha ;marwa;Saad ;Safa ;Ferdous

• A tous les membres de ma famille, petits et grands

ABELLAH ZOHRA

Remerciement

Tout d'abord et avant tout, nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonte pour accomplir ce travail.

Ce travail de master a été préparé et réalisé au Département des sciences et technologies de l'Université Ahmed draya Adrar en collaboration avec l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien Adrar

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur «Dr Sayhi » d'avoir proposé un sujet très intéressant et pour l'orientation, la confiance et la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas été accomplis. Un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous remercions aussi le co-encadreur «Pr. Slimani» la personne qui nous a aidé pour termine ce travail et pour sa disponibilité et ses conseils qui ont enrichis nos connaissances.

Nous tenons à remercier notre tuteur de stage «Bouarbala Zahra» pour sa disponibilité et l'accueil qui nous a été réservé par l'équipe du STEP .

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés dans ce travail de près ou de loin.

Table des matières

Résumé	i
Abstract.....	i
Dédicaces.....	i
Remerciements	iv
Table des matières	iv
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiii
Introduction générale.....	[1 2]
CHAPITRE 01:GENERALITE SUR LE SYSTEME EOLIEN –PHOTOVOLTAÏQUE	
I.1Généralité sur les système éolienne	
I.1.1 Introduction	3
I.1.2 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I-1-3 Structure d'une éolienne.....	[4 5 6]
I-1-4 Principe de fonctionnement	6
I-1-5 Les différent types d'éoliennes	[7 8]
I-1-6 Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne	[8 9]
I-1-7 les avantages et les inconvenientdes installations éoliennes.....	[9 10]
I-1-8conclusion.....	10
I.2. Généralité sur les systèmes photovoltaïque	
I-2-1 Introduction.....	[10 11]
I-2-2 Rayonnement solaire :.....	[11 12]
I-2-3 Le spectre de rayonnement solaire	13
I-2-4Spectre de lumière.....	13
I-2-5 Durée d'insolation	13
I-2-6 Description d'éléments des systèmes PV.....	13
I.2.6.1.La cellule solaire.....	[13 14]

I-2-7 Structure des cellules PV.....	[14 15]
I-2-8 L'effet PV.....	15
I-2-9 Technologie des cellules PV.....	[15 16 17]
I-2-10 Fonctionnement de la cellule PV.....	[17 18]
I-2-11 Caractéristiques des cellules PV.....	18
I-2-12 Association des cellules PV.....	[18 19]
I-2-13 Avantages et inconvénients des GPV.....	19
I-2-14 Module PV.....	20
I-2-15 Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un module PV.....	[20 21]
I-2-16 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	[22 23]
I-2-17 Conclusion.....	24

CHAPITRE 02: MODELISATION DE LE SYTEME PVET L'ENERGIE

EOLIENN

II-1 introduction	25
II.2.Système photovoltaïque.....	25
II.3.Modélisation du générateur photovoltaïque.....	26
II.3.1.Le modèle idéalisé.....	26
II.3.2.Le modèle à une diode (modèle réelle).....	26
II.3.3.Le modèle à deux diodes.....	26
II.4 .Présentation et modélisation mathématique du panneau solaire.....	26
II.4.1. Modèle mathématique de la cellule PV.....	27
II.4.1.1.Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV.....	27
II.4.1.2. MODELISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE IDEALE.....	[27 28]
II.4.1.3.Modélisation d'un circuit réel.....	[28 29 30]
II.5 .Modélisation d'un module photovoltaïque.....	[30 31]
II.6.Optimisation de la puissance des modules PV.....	32.
II.6.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	[32 33]
II.6.2. Méthode de conductance incrémentale (I N C).....	[33 34]
II.6.3.Méthode de fraction du courant I_{cc} (F C C).....	35
II.6.4.Méthode d'une Fraction de la Tension Voc.....	35

II.7.Modélisation de système photovoltaïque.....	35
II.7.1.Modélisation de générateur photovoltaïque.....	[35 36]
II.7.2.Modélisation de convertisseur statique boost.....	[36 37 38]
II.7.3 Le command MPPT	[38 39]
Partie II modélisation de système éolienn.....	
II.8. Structure de la chaine de conversion éolienne.....	39
II.9. Modélisation de la chaine de conversion éolienne.....	39
II.9.1. Modélisation du vent.....	[39 40]
II.9.2.Modélisation de la turbine.....	[40 41]
II.10.les constituants de la centrale eolinnekabertene	42
II.11.caractéristique d'aérogénérateur centrale kabertene.....	43
Conclusion.....	43
CHAPITRE 3:SIMULATION DE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	
III.1.Introduction.....	45
III.2.L'environnement MATLAB/Simulink.....	45
III.3.Création du modèle de la cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	45-50
III.4. Résultats et discussions de simulation.....	50
III.4.1. Caractéristiques de la cellule PV.....	50-51
III.4.2.Effet de la température sur un panneaux photovoltaïque.....	51-52
III.4.3.Effet de l'irradiation sur les caractéristiques I-V.....	52
III.4.4.Groupement des cellules solaires.....	53
III.4.4.1. Module photovoltaïque.....	53
III.4.4.2.Groupement en série.....	53
III.4.5.L'influence de la résistance série R_s	53-54
III.4.6.L'influence de la résistance parallèle.....	54-55
III.5.Simulation d'un système Photovoltaïque.....	55
III.5.1.Simulation d'un GPV.....	56
III.5.2.Simulation de convertisseur statique boost.....	56-57
III.5.3.Simulation de la commande MPPT numérique « P&O ».....	58-59
III.6.Résultats et discussions.....	59
III.7.Simulation de conversion éolienne.....	59-60
III.7.1.Résultat de la simulation du vent.....	60

III.8.Simulation de la turbine éolienne.....	60-61
III.8.1. Résultat de la simulation.....	
III.9.Conclusion.....	
Chapitre IV : Etude théorique de système hybride (éolienne – photovoltaïque).....	
IV.INTRODUCTION.....	64
IV.1.Définition de système hybride.....	64
IV.2.La configuration des systèmes hybride.....	64
IV.3.Les différentes combinaisons de système hybride.....	64-65
IV.4.Avantages et inconvénients d’un système hybride.....	65-66
conclusion générale.....	
Bibliographie.....	

Liste des figures

LES figures des CHAPITRE 1

- Figure I.1. Schéma représente la concept d'énergie éolienne
- Figure I.2. Les différents composant éolienne
- Figure I.3. Principe de fonctionnelle de l'énergie éolienne
- Figure I.4. Les différents types d'éolienne à axe horizontale
- Figure I.5. Les différents type d'éolienne à axe verticale
- Figure I.6. Différent type d'éolienne offshore
- Figure I.7. Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent
- Figure I.8. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal
- Figure I.9. le specter de la lumière
- Figure I.10. Structure équivalente d'une cellule photovoltaïque
- Figure I.10. Structure basique d'une cellule PV
- Figure I.11. Les différents technologies de cellules
- Figure I.12. Le principe de fonctionnement de panneaux photovoltaïques
- Figure I.13. Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension
- Figure I.14. Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension
- Figure I.15. Module photovoltaïque
- Figure I.16. Courbe $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque
- Figure I.17. Courbe $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

LES figures des CHAPITRE 2

- Figure II.1. Le système photovoltaïque
- Figure II.2. Circuit électrique d'un générateur photovoltaïque
- Figure II.3. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque
- Figure II.4. Circuit idéal de système PV
- Figure II.6. Module générale de panneau PV
- Figure II.7. Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire
- Figure II.8. Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O)

Figure II.9. Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe ($\frac{dP}{dV}$) sur la caractéristique de la puissance

Figure II.10. Organigramme de la méthode conductance incrémentielle

Schéma II.11. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande

Figure II.12. schéma représenté la convertisseur statique boost

Figure II.13. schéma représenté les schemas equivalents du circuit à chaque position del'interrupteur k

Figure II.14. Structure de la chaine de conversion éolienne

Figure II.15. Figure présenté la turbine éolienne

Figure II.16. Coefficient de puissance pour différents angles de calages

Figure II.17. Schema bloc du modele de la turbine

Figure II.18. LES CONSTITUANTS DE LA CENTRALE EOLINNE
KABERTENE

LES figures des CHAPITRE 3

Figure III.1. Lancer Matlab

Figure III.2. Lancer Simulink

Figure III. 3. Circuit sous-système 1

Figure III. 4. Circuit sous-système 2

Figure III. 5. Circuit sous-système 3

Figure III. 6. Circuit sous-système 4

Figure III. 7. Circuit sous-système 5

Figure III. 8. Circuit sous-système 6

Figure III. 9. Interconnexion de tous les six sous-systèmes

Figure III. 10. Modèle d'une cellule PV sous Simulink.

Figure III.11. Caractéristiques (I-V) de panneaux solaire de type **YL245p-29b**

Figure III.12. Caractéristiques (P-V) de panneaux solaire de type **YL245p-29b**

Figure III.13 . Caractéristique *I-V pour différentes températures*

Figure III.14 . Caractéristique P-V pour différentes température

Figure III.15 . Caractéristique I-V pour différent irradiations (cellule solaire)

Figure III.16. La *caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque*

Figure III.17 . *Influence de R_s sur la caractéristique $I=f(V)$*



Figure III.18 . *Influence de R_p sur la caractéristique $I=f(V)$*

Figure III.19. schéma block de système photovoltaïque

Figure III.20. schéma représente la simulation de GPV

Figure III.21. Représenté le bloc de convertisseur boost

Figure III.22. représenté les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur

Figure III.23 . Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

Figure III.24. Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

Figure III.25. Bloc de simulation de la vitesse du vent

Figure III.26. évolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s)

Figure III.27. Modèle Simulink de turbine éolienne avec le résultat

LES figures des CHAPITRE 4

Figure IV.1. schéma représente un système hybride

Figure IV.2. système hybride (photovoltaïque –éolienne)

Liste des tableaux

Tableau I.1.présentation de la rendement typique et théorique de différentes technologies

Tableau II.1.les différents des facteurs idéals en fonction de la différente technologies

Tableau II.2.Les Caractéristique de module PV de type YL245P-29b utilisé en simulation

Tableau II.3.Les caractéristique d'éolienne de type G52 dans Kabertene

Liste des abréviations

PV: photovoltaïque

R_s : résistance série

R_p :résistanceparallèle

I_{ph} :Photo-courant

I_d :Courant diode .

I_{sh} :Le courant traversant la résistance shunt (parallèle)

I :Courant de sortie de cellule

I_d : courant de saturation inverse de la diode.

V_t :potentiellethermodynamique.

K : la constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en Kelvin.

q : la charge d'un électron $=1,6.10^{-19}$ C.

A : le facteur d'idéalité de la jonction.

V : la tension aux bornes de la cellule

I_{sc} :est le courant de court-circuit de la cellule à 25°C et $1000\text{W} / \text{m}^2$,

K_i :le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

T_{ref} :est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) ($= 25^\circ\text{C} + 273$),

G : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m^2),

G_{ref} :est l'insolation de référence de la cellule ($= 1000\text{W} / \text{m}^2$),

I_s : courant saturation

I_{ph_ref} : photo courant de référence à T_{ref} [A]

I_{s_ref} : courant de saturation de référence à T_{ref} [A]

V : Tension de la cellule [V]

V_{th} : Tension thermique [V]

T :Temperature de jonction de la cellule [K°]

T_{ref} :Temperature de référence de la cellule [K°] ($T=25^\circ\text{C}=298\text{K}^\circ$)

K_i : coefficient de Temperature

q : charge de l'électron ($1.6*10^{-19}$ coulomb)

E_g : Energie de Gap de la cellule (Silicium cristallin $E_g=1.12\text{ eV}$ à 300K°)

K : constante de Boltzmann ($1.3805*10^{-23}\text{J/K}$)

R_s : Résistance Série [Ω]

R_{sh} : Résistance Shunt (ou parallèle) [Ω]

A: Facteur d'idéalité de la jonction ,normalement compris entre 1et2
Ns: nombre des cellules en série d'un module PV
Isc: est le courant de court-circuit
Vco: est la tension en circuit ouvert
Ia: courant de saturation inverse de la diode.
Pmax : Puissance maximale [w]
Vpm : Tension à Pmax [V]
Ipm : Courant à Pmax [A]
Vco : Tension du circuit ouvert [V]
Icc : Courant de court-circuit [A]
K : la constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ Joules/Kelvin).
T : la température de la cellule en Kelvin.
V: la tension aux bornes de la cellule
Is: courant saturation
I_{ph_ref}: photo courant de référence à T_{ref} [A]
I_{s_ref}: courant de saturation de référence à T_{ref} [A]
V: Tension de la cellule [V]
T:Temperature de jonction de la cellule [K°]
T_{ref}:Temperature de référence de la cellule [K°] ($T=25C^{\circ}=298K^{\circ}$)
K_i: coefficient de Temperature
q : charge de l'électron ($1.6*10^{-19}$ coulomb)
E_g: Energie de Gap de la cellule (Silicium cristallin $E_g=1.12$ eV à $300K^{\circ}$)
K: constante de Boltzmann ($1.3805*10^{-23}$ J/K)
 ρ :est la densité d'air [$Kg.m^{-3}$],soit $1.2 Kg.m^{-3}$ à $20C^{\circ}$
S : Est la surface circulaire balayée par la turbine
V_v: Est la vitesse du vent [m/s].
P_t: la puissance de la turbine
T_{em} : le couple électromagnétique
T_t : le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
 Ω : est la vitesse mécanique de la génératrice.
G : est le gain du multiplicateur
MPPT: Maximum Power PointTracking.
MPP : Maximum Power Point
FF : Facteur de forme

DC/DC : Continu/continu

AC/DC : Continu/alternative.

GPV: générateur photovoltaïque

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont un moyen de répandre plus de justice entre le monde riche et les pays pauvres. En adoptant les énergies renouvelables, nous rendrons notre avenir respectueux de l'environnement. Les énergies renouvelables de toutes sortes, issues de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, de l'énergie hydraulique, de l'énergie organique et d'autres énergies «naturelles», car elles sont considérées comme un espoir pour l'avenir, d'une part parce qu'elles sont inépuisables, et d'autre part parce qu'elles ne polluent pas l'environnement. En ce qui concerne les aspects économiques et sociaux, l'application des technologies modernes pour générer ces types d'énergie nous permettra d'offrir des possibilités d'emploi aux jeunes.

Dans notre mémoire, nous avons abordé les deux sources les plus abondantes au monde, "l'énergie solaire et éolienne"

L'énergie solaire est l'une des énergies de base les plus importantes vue l'abondance du rayonnement solaire de source naturelle dans l'univers. L'énergie électrique est produite à partir de l'absorption du spectre lumineux à l'aide de panneaux solaires qui ont des propriétés qui leurs permettent de convertir cette absorption en énergie exploitable. Par ailleurs, l'énergie électrique est produite à partir de la vitesse du vent, grâce aux ventilateurs et aux moteurs qui convertissent la vitesse et le mouvement du vent en énergie électrique. Ce procédé est appelé énergie éolienne.

Dans notre mémoire on s'est proposé d'étudier une installation électrique réelle à base de systèmes photovoltaïques, de systèmes éoliennes ou hybride (PV-Eolien). Notre étude devrait nous permettre, sur la base de données expérimentaux recueillîtes, de confectionner un model mathématique dont la simulation servirait au diagnostic et à la prise de décision. La situation qu'a connu le monde entier suite au virus COVID-19 et le confinement dont on a été victime, nous a contraint de minimiser nos objectifs expérimentaux et de les substituer par des études théoriques.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous avons exposé des généralités sur les énergies éoliennes et solaires dans lesquelles nous avons montré ce qu'elles sont et les composants de base des deux technologies de production d'énergie, et nous avons également montré les avantages et les inconvénients de chacune.



- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le GPV et le convertisseur statique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT; et présentera le principe de la recherche de point maximal, les classifications de la commande MPPT, ainsi nous avons parlé sur la modélisation de système éolienne comme suit:

- ✓ Modélisation de vitesse de vent
- ✓ Modélisation de la turbine

- Le troisième chapitre, nous avons discuté de la façon de simuler à la fois le système d'énergie solaire et le système d'énergie éolienne grâce à des données expérimentales qui ont été introduites dans le programme de simulation du système d'énergie solaire et du système éolienne.

- Dans le quatrième chapitre nous avons essayé, dans le laps de temps imparti, à approché le système hybride à travers une étude théorique sur la base de la bibliographie disponible.

- Nous clôturons ce mémoire avec une conclusion générale qui résume les étapes et résultats que nous avons obtenus.

Il convient également de noter que nous avons exploité les travaux appliqués à la fois à SKTM et à la société d'énergie éolienne située à Caberton-Adrar afin d'apporter les données expérimentales et de les entrer dans le programme de simulation.

Chapitre 01:

Généralité sur le système éolienne et le
système photovoltaïque

Introduction

Le vent est une énergie naturelle capable de créer de l'électricité ou une force mécanique :c'est l'énergie éolienne .Le mot éolienne vient du grec"éole" ,qui signifiant dieu du vent et just"rapide" "vif" et qui désignait dans l'antiquité grec .Ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie :les éoliennes.

L 'utilisation de cette énergie n'a aucun effet néfaste pour l'environnement,ceci fait d'elle une énergie propre donc une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et auxémissions de gaz à effet de serre .Les éoliennes représentent également une chance de se ravitailler en électricité pour plus de deux milliards de personnes.[1]

Pour des sites isolé l'énergie éolienne pourrait être utilisée pour satisfaire le besoin en énergie électrique telle que:

- ✓ La conversion de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile),pour pomper de l'eau (moulins de majorque ,éolienne de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail)ou pour faire tourner la meule d'un moulin
- ✓ Production d'électricité: Une génératrice éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique pour produire de l'électricité, l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour produire un courant continu ou courant alternative .Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système ((autonome))avec un générateur d'appoint (groupe électrogène),un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie .[2]

La recharge électrique des batteries,une énergie stockée qui sera exploiter ultérieurement, pour fournir de l'électricité de base (éclairage, radio, petit poste de télévision),au moyen de petits aérogénérateur, très répandue en chine.

I.1.2.Définition de l'énergie éolienne

L'énergie du vent fait tourner les pales d'un aérogénérateur, qui entraînent la rotation du rotor connecté à une génératrice en produisant de l'énergie électrique. Cette dernière est injectée dans le réseau électrique grâce à un transformateur. comme l'indique le schéma.

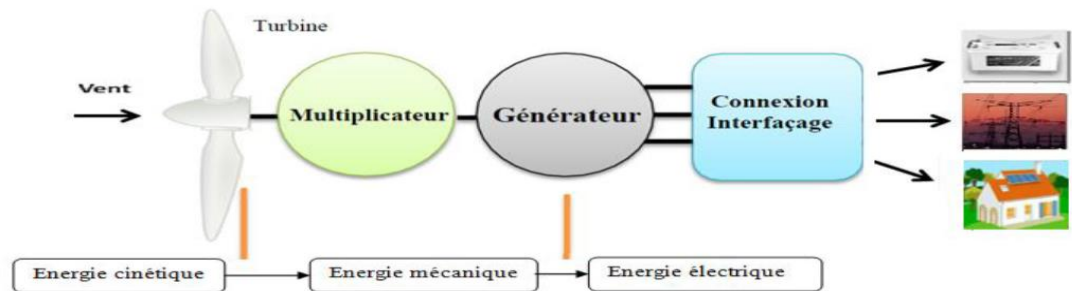


Figure I.1.Schéma représenté la concept d'énergie éolienne [3]

I.1.2.Structure d'une éolienne

Les principaux constituants d'une éolienne sont [4].

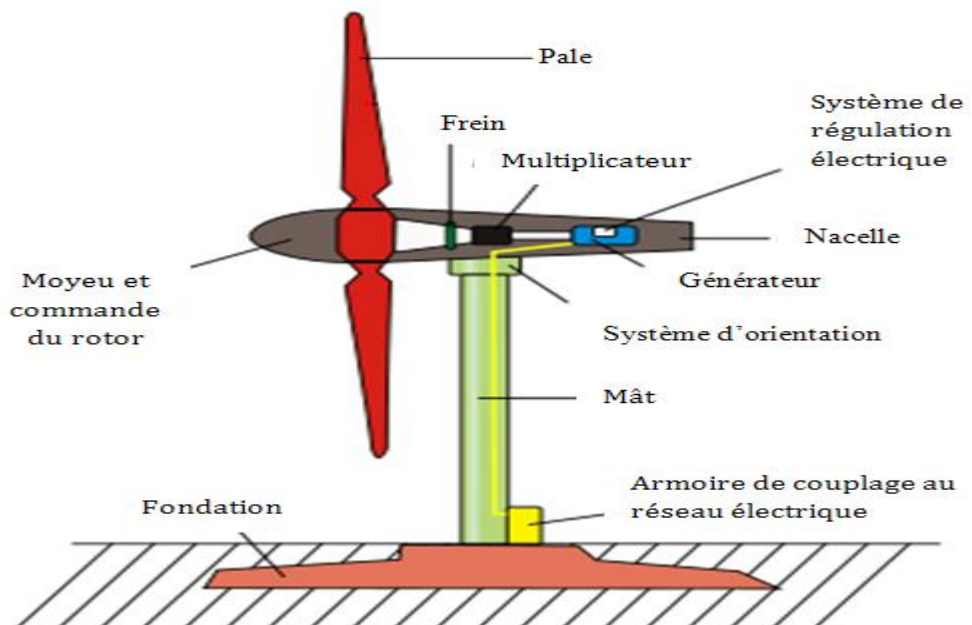


Figure I.2. Les différents composant éolienne [5]

Un mât : son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, pour lui permettre de tourner à une vitesse importante.

Un rotor : il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du moyeu de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique.

Une nacelle : montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produit eau sein du réseau.

L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

Le générateur électrique il assure la production d'électricité. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour déraisons de coût et de rendement

Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à l'huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.

Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

I.1.3. Principe de fonctionnement de l'éolienne pour produire de l'énergie électrique [6]

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes :

- au niveau de la turbine, qui reçoit 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 qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie.

le principe de fonctionnement générale est affiché dans la figure suivante.

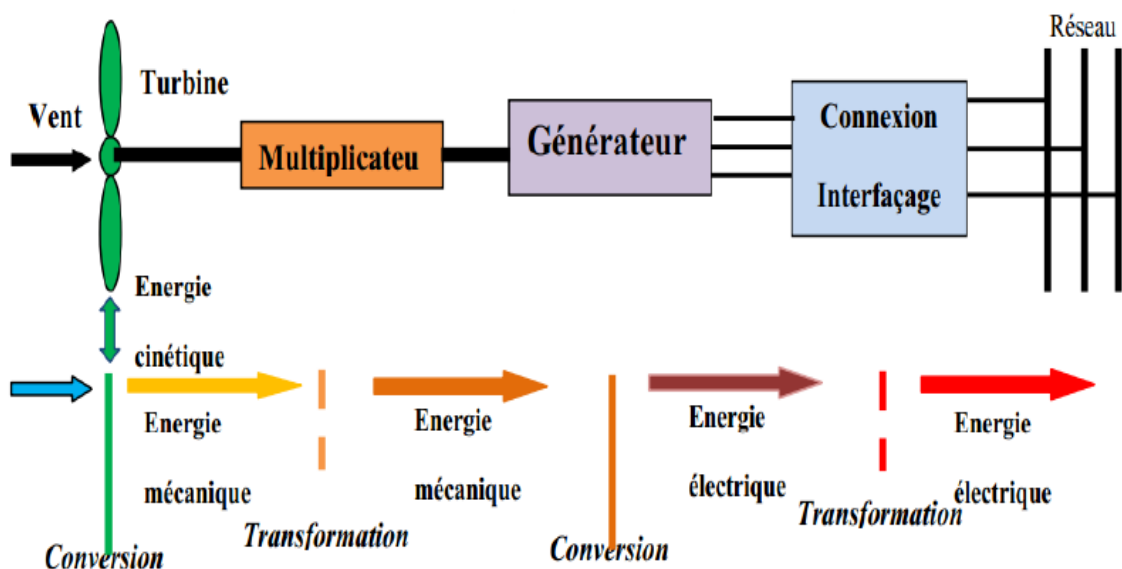


Figure I.3.Principe de fonctionnelle de l'énergie éolienne [6]

I.1.4. Les différents types d'éoliennes on shore (sur terre)

Il existe différentes sortes d'éoliennes (terrestres) :

- **Eoliennes classiques** à 1, 2 ou 3 pales (axe horizontal) :

Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pâles tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne.

- **Eoliennes à axe vertical** (savonius et darrieus) :

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale.

- **Eoliennes à axe horizontal** (Aval et Amont, carénage)

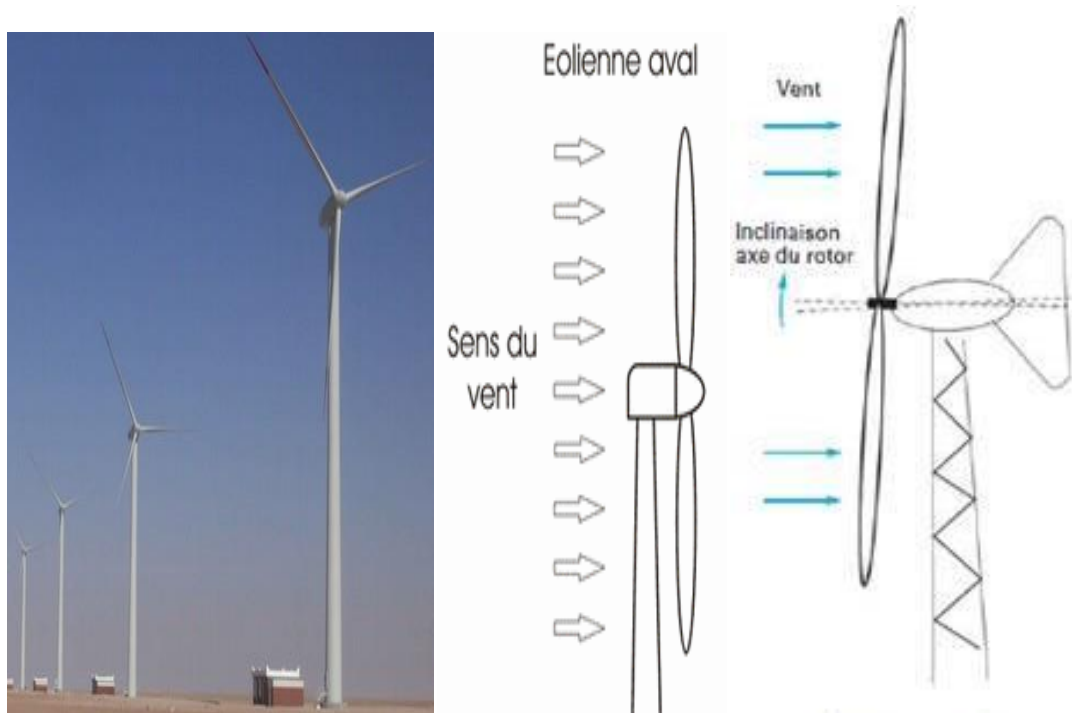


Figure I.4. Les différents types d'éolienne à axe horizontal [7]



Figure I.5. Les différents types d'éolienne à axe verticale [8]

Les éoliennes offshore (en mer)

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Le terme anglais offshore signifie littéralement « hors cotes », par opposition aux éoliennes terrestres ou onshore". "



Figure I.6. Different type d'éoliennoffshore [8]

I.1.5. Les fondations d'une éolienne

Les fondations d'une éolienne sont faites à partir de blocs de béton armé (alliage de béton et d'acier), enfoncés dans le sol. Sur ces fondations, viendra se fixer la première partie du mât.

I.1.6. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

La régulation d'une source éolienne de secours est un facteur primordial pour son bon fonctionnement. La régulation à double objectif, d'une part la protection l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, l'éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de nominale relatif du vent V_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine de l'éolienne doit modifier ces paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n du vent relatif, on spécifie aussi: V_d : Vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie, et V_m : la vitesse d'arrêt de la machine pour laquelle

la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour les raisons de sureté de fonctionnement.

Les vitesses V_n , V_d et V_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Fig I-7) [9]

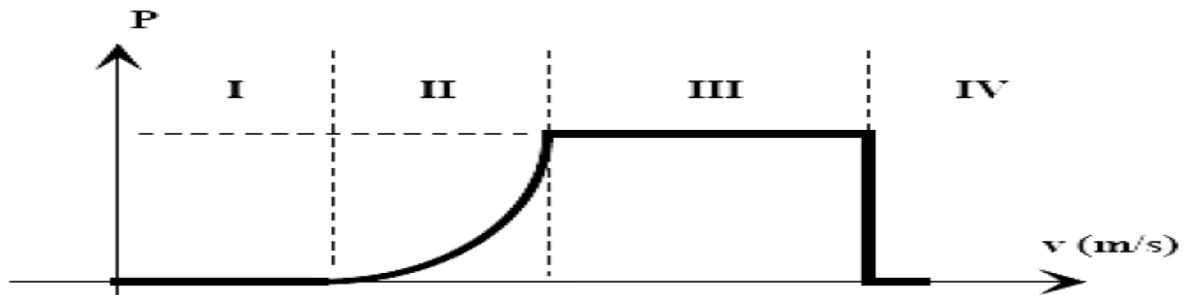


Figure I.7. Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

On peut distinguer 4 zones sur cette courbe:

Zone I: où $P_{\text{sortie}} = 0$ (la turbine ne fonctionne pas) le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor de l'éolienne.

Zone II: La vitesse de démarrage est atteinte, la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale.

Zone III: la puissance de sortie est maintenue à la puissance nominale presque constante grâce au dispositif de régulation.

Zone IV: l'éolienne est mise en arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle

I.1.7. Les avantages et les inconvénients des énergies éolienne

Les avantages

- l'énergie éolienne est une source renouvelable.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel

moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nuclé

Inconvénients

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs

I.1.8. Conclusion

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, non polluante avec un grand potentiel de développement. En effet, les éoliennes ne rejettent aucun gaz ou substance dangereuse dans l'environnement et n'entraînent pas de production de déchets.

I.2. Généralité sur les systèmes photovoltaïques:

I.2.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale en énergie électrique [10]. c'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et la diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. Le nom Photovoltaïque est composé de deux parties: Photos du grec qui signifie : Lumière. Volt : Unité de tension électrique, qui correspond au nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquerel]. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des

années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [11]

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante. Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques. Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule.

I.2.2.L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [12], les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes pour atteindre la terre. l'énergie solaire est propre, et est une source d'énergie qui dépend du soleil, cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = \frac{h \times C}{\lambda} \quad [I. 1]$$

Avec:

h : la constante de Planck ($h=6.62 \times 10^{-34}$ JS)

C : la vitesse de la lumière ($C=3 \times 10^8$ m/s)

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.25}{\lambda} \quad [I.2]$$

Avec:

λ : la longueur d'onde [μm]

I.2.3.Rayonnement solaire

Est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2et 4.10-6m .sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent :

1- Le rayonnement direct

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

2-Le rayonnement diffuse

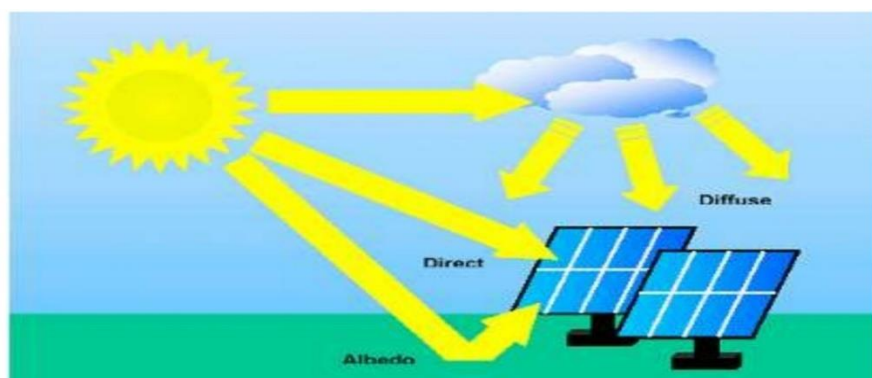
Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et la poussières qui produisent cet(éclatement) des rayons du soleil . Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

3-L'albédo

Du sol est le rayonnement réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

4-Le rayonnement global

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.[13]



**Figure I.8. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal
Le spectre de rayonnement solaire**

Le spectre de rayonnement solaire est de nature électromagnétique qui se propage en quantités énergétiques bien définies dites photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde.

I.2.4. Le spectre de la lumière

Est l'ensemble des rayons lumineux de différentes longueurs d'ondes formant une palette allant de l'ultraviolet à l'infrarouge comme le figure (I-9)

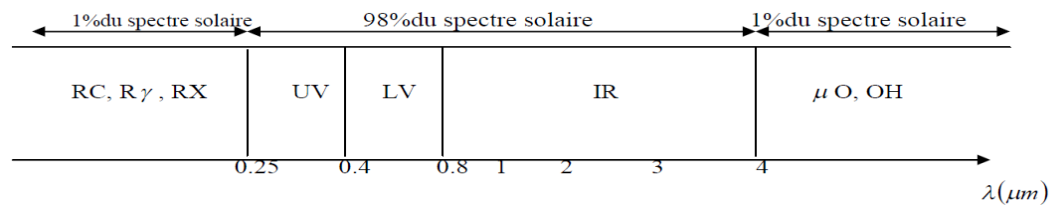


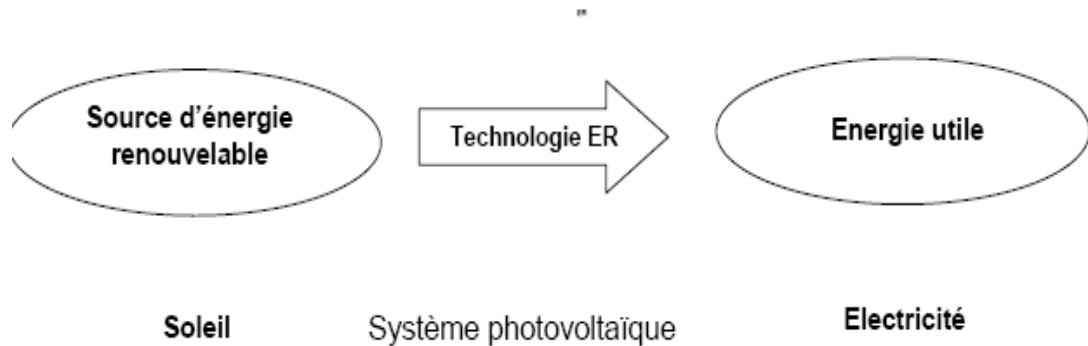
Figure I.9. le spectre de la lumière [14]

I.2.5. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés. On parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. [14]

I.2.6. Description des éléments d'un système photovoltaïque

I.2.6.1. La cellule solaire : La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé effet photovoltaïque



I.2.7. Structure de la cellule photovoltaïque

La cellule est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. Parmi les cellules photovoltaïques utilisant le silicium comme matériel de base on distingue les monocristallins, les polycristallins et amorphes. Généralement, la couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative. La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous positifs (P). Il faut ajouter des contacts électriques transparents, une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons, ainsi qu'une couche de verre pour résister aux intempéries. [15]

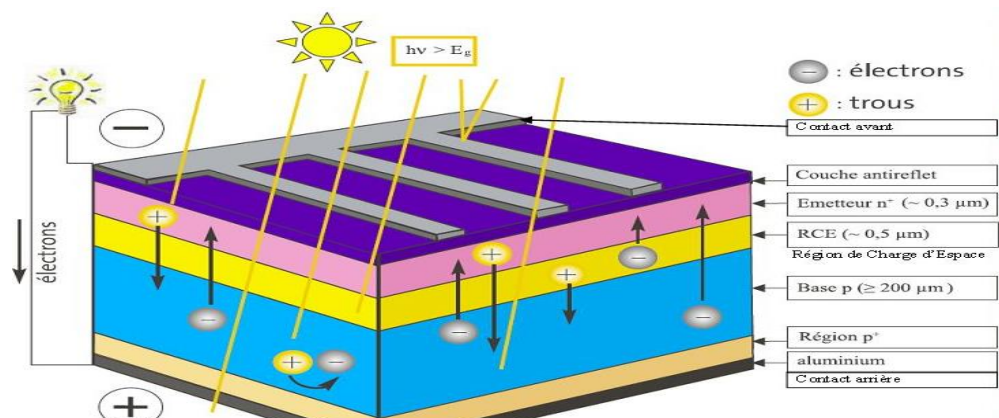


Figure I.10. Structure équivalente d'une cellule photovoltaïque [8]

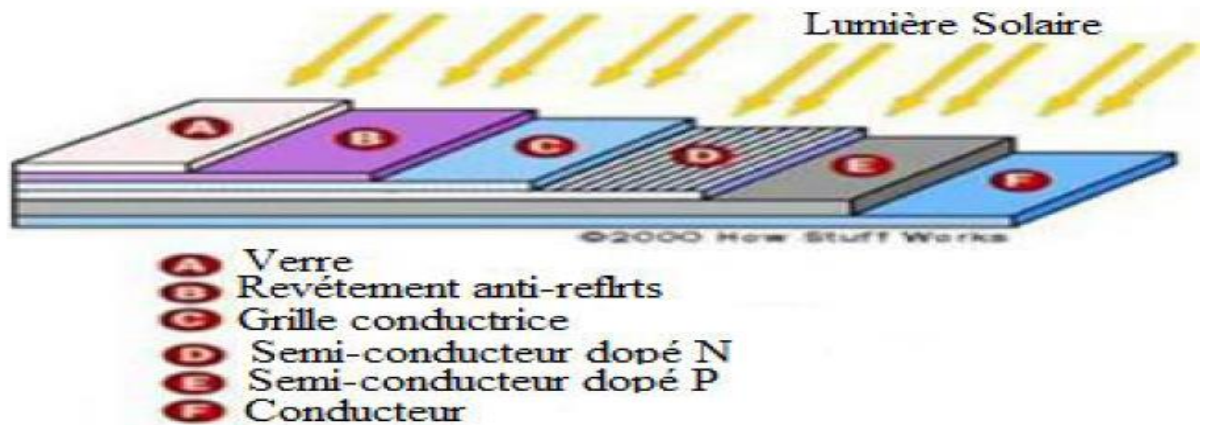


Figure I.10. Structure basique d'une cellule PV [16]

I.2.8.L'effet photovoltaïque

Définition

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la suivante: [18]

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda} \quad (I.3)$$

D'après la relation (I.3), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques .

I.2.9.La technologies des cellules solaires

On parle ici principalement des cellules cristalline ou à couche mince

I.2.9.1. La cellule cristalline (qu'elle soit mono ou poly)

Est une technologie éprouvée et robuste (espérance de vie : 30 ans), dont le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent près de 80 % de la production mondiale en 2000.

I.2.9.1.1. La cellule monocristalline : Sont des cellules qui s'approche le plus du modèle théorique, elles est effectivement composée d'un seul cristal divise en deux couches. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, elle à un rendement supérieur à celui des cellules poly-cristalline.

I.2.9.1.2. La cellule poly-cristalline

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées : elles représentent 49 % de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements est de 13% jusqu'à 20% en labo.

I.2.9.2. La cellule amorphe

Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleur marché que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000, alors qu'elles représentaient 12 % en 1999. D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces [18]

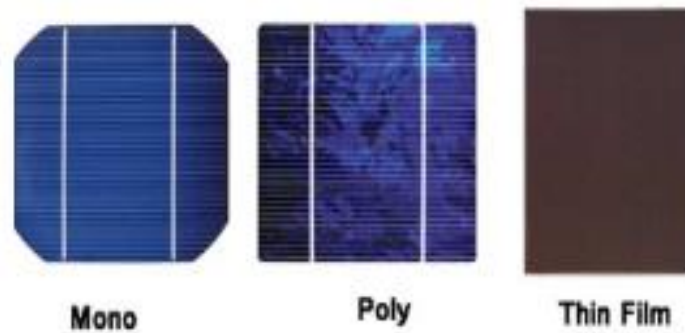


Figure I.11. Les différents technologies de

Les rendements typiques et théoriques des différentes technologies.

Tableau I.1. présentation de la rendement typique et théorique de différentes technologies

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement théorique (%)
Monocristallin	12-18	24
Polycristallin	11-15	19.8
Amorphe	5-8	13

I.2.10. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches du même semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment:

- **Dopage de type N** : un atome de silicium compte 4 électrons. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires.
- **Dopage de type P** : l'autre couche de la cellule est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé.

Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde. Les électrons en excès dans le matériau dopé N se dirigent naturellement vers le matériau dopé P

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur une figure 12..Electrode supérieur est une grille permettant le passage des rayons lumineux.

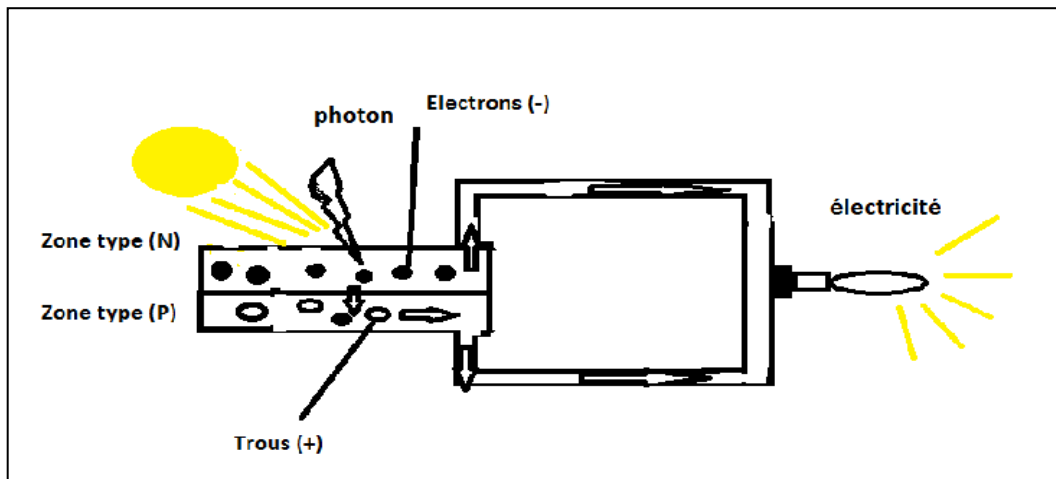


Figure I.12. Le principe de fonctionnement de panneaux photovoltaïque

I.2.11. Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque. La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairage, elle joue le rôle d'un générateur de courant DC

I.2.12. Association des cellules photovoltaïques

I.2.12.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.[19]

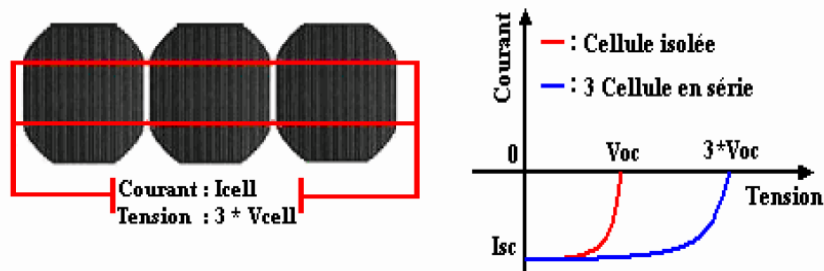


Figure I.13. Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension

I.2.12.2. Association en parallèle [19]

En additionnant les modules identiques en parallèle, 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

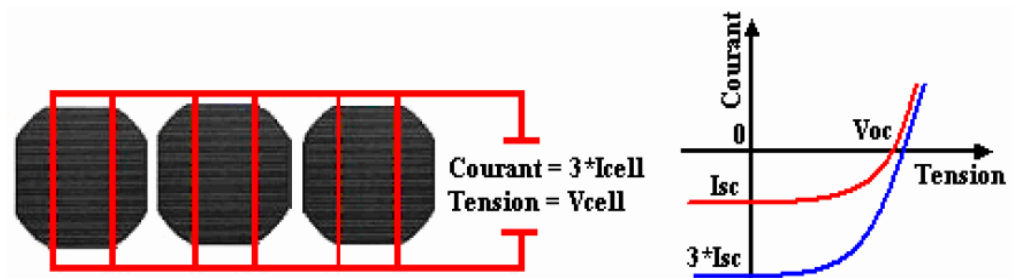


Figure I.14. Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

I.2.13. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques

Avantages

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville

Inconvénients:

- La production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, est toujours variable.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible

I.2.14.Le module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques ou les panneaux solaires sont des dispositifs utilisés pour capter l'énergie de la lumière du soleil. Les panneaux solaires photovoltaïques contiennent un ensemble de cellules solaires qui convertissent la lumière en électricité . ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène–Vynil–Acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène .

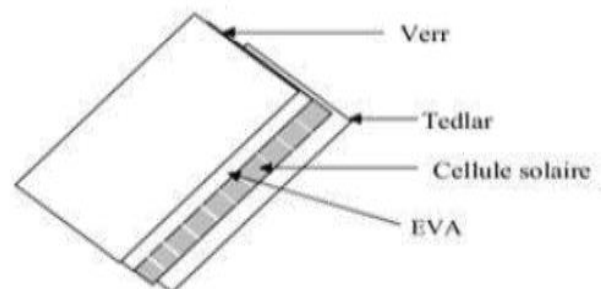
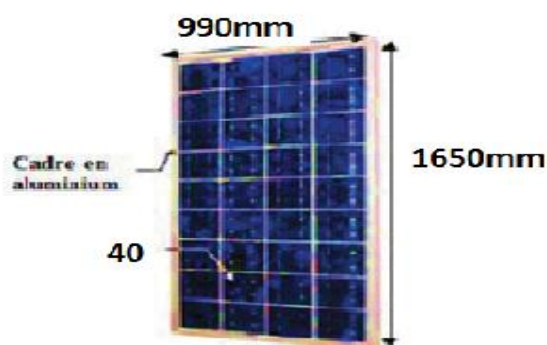
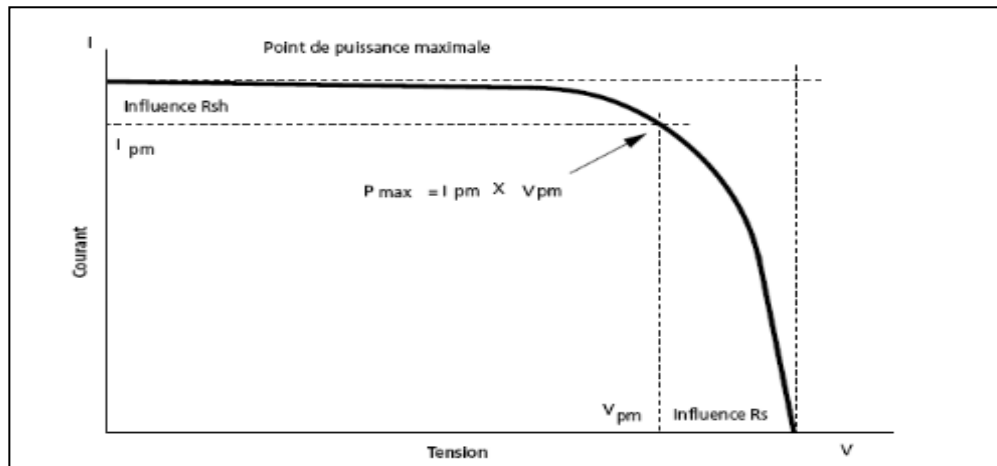


Figure I.15. Module photovoltaïque

I.2.15. Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un module [20]

I.2.14.1. Caractéristiques courant-tension

La figure ci-dessous représente la courbe $I = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque Typique dans les conditions standard ($T=25^{\circ}\text{C}$ et un éclairage de 1000W/m^2)



I-Courant de court circuit

$I_{cc} = I_{ph}$, est proportionnel à l'éclairage et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit ($V=0$).

2-La tension à vide V_{co}

Cette tension correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$), $I_c = 0$.

3-Le Point de Puissance Maximale

Figure I.16. Les caractéristique réelle (I-V) du panneaux sipée dans la charge resistive est maximale. photovoltaïque

4- Le rendement maximal

c'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente. $\eta =$

$$\frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{S \times G} \quad (I-3)$$

5-Le facteur de forme

c'est le rapport entre la puissance délivrée à la charge et le produit de I_{cc} et V_{co}

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I-4)$$

I.2.14.2. Caractéristique puissance-tension La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P=V.I$. Pour chaque point, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P=f(V)$.

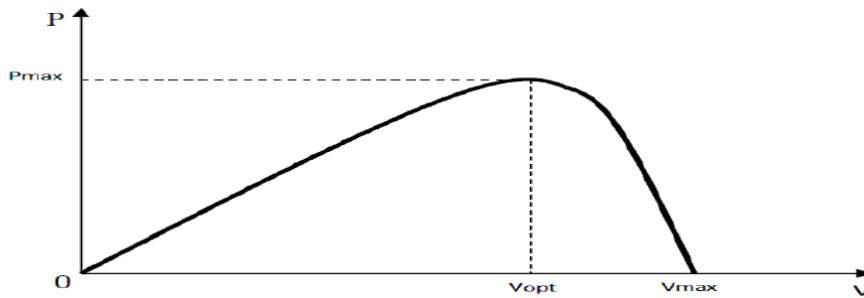


Figure I.17. Courbe $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_{max}). Cette puissance correspond, à une tension V_{opt} et un courant I_{opt} .

I.2.16. Avantages et inconvénients d'une installation PV

a) Avantages [21]

Son carburant est gratuit

Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).

L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants

L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun co-produit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Le photovoltaïque est donc

une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs

Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être reutilisés:

Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance : Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées

Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible).

L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments

Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique □ L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la Consommation mondiale pendant une année : Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale

b) Inconvénients

Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de chose dans le bilan énergétique mondial. L'ensemble des modules existant actuellement produit autant d'énergie que 20 % d'une tranche nucléaire. Ce n'est notamment pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux nationaux actuels.

1- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

2- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%)

3- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

4- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru .la fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis

5- Tributaire de la condition météorologique.

6-Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à230 V alternatif. Or, l'énergie issus du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

I.2.17.Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances .

Chapitre02:Modélisatio n des systèmes éolienne- photovoltaïque

Introduction

En physique , la modélisation est une phase essentielle, ou c'est la représentation d'un système par un autre plus facile à appréhender . Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique.

Dans ce chapitre, nous présenterons, la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, en proposant l'élaboration des modèles mathématiques pour les deux systèmes de production, afin de renforcer la maîtrise de leur exploitation, surtout du point de vue puissances de production, en fonction des conditions météorologiques données ou estimées.

Partie 1.Modélisation de systèmephotovoltaïque

II.2.Système photovoltaïque [22]

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT comme le montre la fig .

Un système photovoltaïque se compose de trois blocs, le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque) dont le rôle est de convertir l'éclairement en courant continu, le second bloc est un convertisseur statique continu-continu qui permet de faire une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie,et on trouve le système de contrôle MPPT basé sur un algorithme qui permet d'agir sur le rapport cyclique pour extraire en permanence la puissance maximale. Le troisième bloc représente la charge

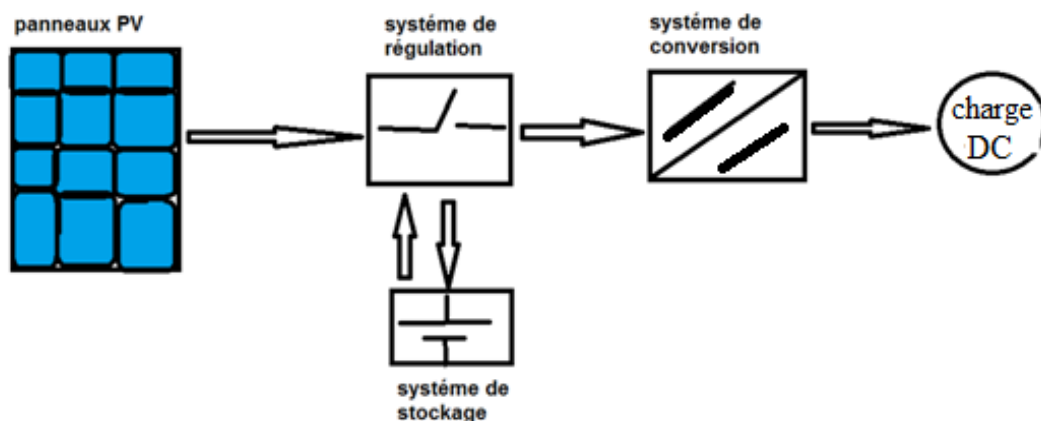


Figure II.1.Lesystème photovoltaïque

II.3.Modélisation du générateur photovoltaïque [23]

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 :

II.3.1.Le modèle idéalisé

c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_p 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.

II.3.2.Le modèle à une diode (modèle réelle)

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_p .

II.3.3.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.

Dans cette chapitre Le modèle choisit est le modèle à une diodeà cinq paramètres qui tient compte de la variation du courant et de la tension de la cellule photovoltaïque en fonction des conditions climatiques. Dans le but de le simuler avec le logiciel Matlab/sumilink pour bien comprendre son fonctionnement et optimiser les paramètres de la cellule PV comme le schema suivent:

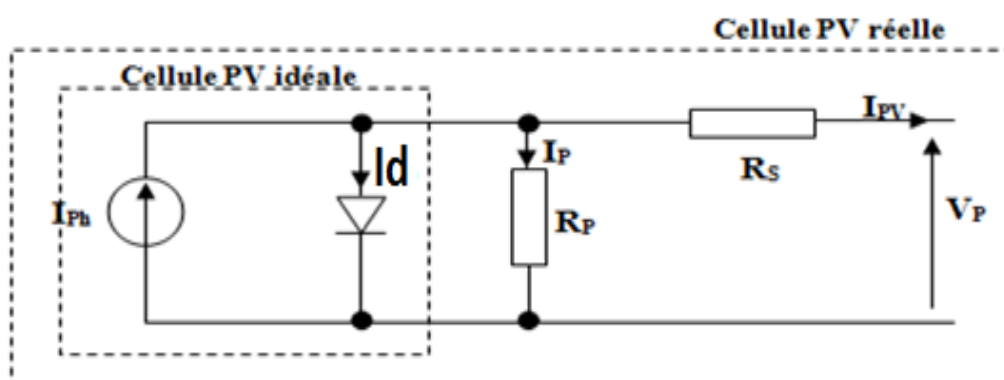


Figure II.2.Circuit électrique d'un générateur photovoltaïque [22]

II.4 .Présentation et modélisation mathématique du panneau solaire

II.4.1. Modèle mathématique de la cellule PV

II.4.1.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur p-n. Lorsqu'il est exposé à la lumière, un courant continu est généré. Pour simplifier, le modèle à une seule diode de la figure 2 est utilisé dans ce document. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision avec la structure de base. Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant (I_{ph}), d'une diode, d'une résistance parallèle (R_p) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série (R_s) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques [22]

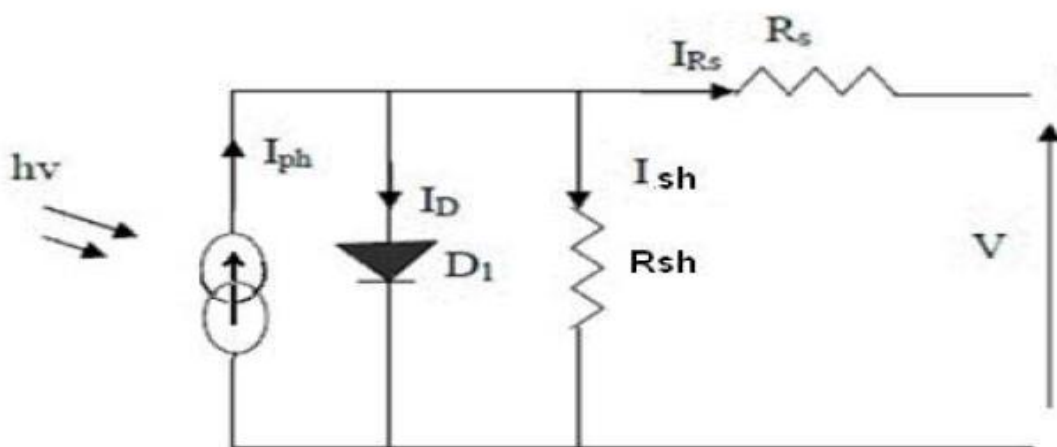


Figure II.3. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [24]

D'après le schéma équivalent (modèle d'une diode) de la cellule solaire "chapitre 2", on constate quatre courants :

- 1-Photo-courant (I_{ph}).
- 2-Courant diode (I_d).
- 3-Le courant traversant la résistance shunt (parallèle) (I_{sh})
- 4-Courant de sortie de cellule (I)

II.4.1.2. MODELISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE IDEALE

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.4), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [25]

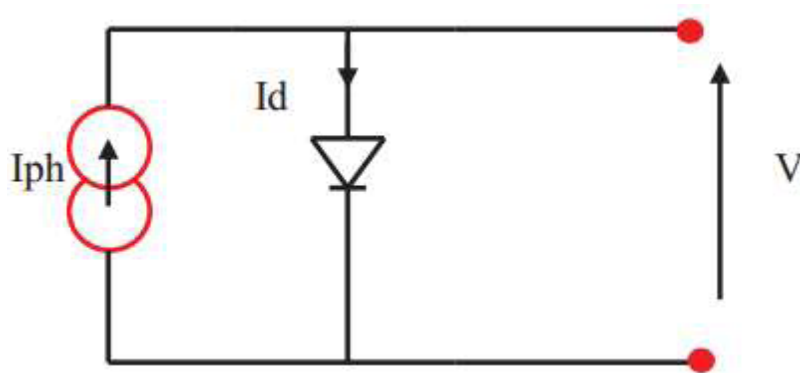


Figure II.4.Circuit idéal de système PV

On appliqué la loi des kirchouf et on se trouve la relation suivant:

$$I = I_{ph} - I_d \quad [II - 1]$$

Avec :

I : courant fourni par la cellule

I_{ph}:photon-courant de la cellule proportionnel à l'éclairement (G)

$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{V}{A \times V_t}\right)} - 1 \right] \quad [II - 2]$$

Avec: $V_t = \frac{K \times T}{q}$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrit comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V}{A \times V_t}\right)} - 1 \right] \quad [II - 3]$$

Avec :

I_d: courant de saturation inverse de la diode.

V_t:potentielletermodynamique.

K : la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en Kelvin.

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

a: le facteur d'idéalité de la jonction.

V: la tension aux bornes de la cellule

II.4.1.3.Modélisation d'un circuit réele

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schema dans la fig II.3

C'est le modèle le plus classique dans la littérature,ilfait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du fluxlumineux incident, une diode pour les phénomènesphysique de polarisation et deux résistances (série et shunt)

A partir de la figII.3 la loi des noeuds (la loi de kirchouffe) nous permet d'écrire la relation suivante:

$$\sum I_{entrant} = \sum I_{sortant} \quad [II - 4]$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad [II - 5]$$

Le courant traversant la résistance shunt (parallèle):

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad [II - 6]$$

Le courant traversant le diode (courant de jonction)

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{(V + IR_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad [II - 7]$$

Le courant délivré par la cellule PV éclairée sur une charge s'écrit

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{(V + IR_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_s} \right) \quad [II - 8]$$

I_{ph} : photo -courant tel que

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \times (T_c - T_{ref})] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad [II - 9]$$

Avec:

I_{sc}:est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m2,

K_i:le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

T_{ref}:est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),

G: est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m2),

G_{ref}:est l'insolation de référence de la cellule (= 1000W / m2),

I_s: courant saturation tel que:

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \times \exp \left[\frac{qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{K \times A} \right] \quad [II - 10]$$

Avec:

I_{ph_ref} : photo courant de référence à T_{ref} [A]

I_{s_ref} : courant de saturation de référence à T_{ref} [A]

V: Tension de la cellule [V]

V_{th} : Tension thermique [V]

T:Temperature de jonction de la cellule [K°]

T_{ref} :Temperature de référence de la cellule [K°] ($T=25C^{\circ}=298K^{\circ}$)

K_i : coefficient de Temperature

q : charge de l'électron ($1.6*10^{-19}$ coulomb)

E_g : Energie de Gap de la cellule (Silicium cristallin $E_g=1.12$ eV à $300K^{\circ}$)

K: constante de Boltzmann ($1.3805*10^{-23}J/K$)

R_s : Résistance Série [Ω]

R_{sh} : Résistance Shunt (ou parallèle) [Ω]

A: Facteur d'idéalité de la jonction ,normalement compris entre 1et2

Le facteur d'idéalité est le facteur idéal qui dépend de la technologie PV et répertorié dans le tableau II. 1 suivant [26]: ‘

Tableau II.1.les différents des facteurs idéals en fonction de la différente technologies

Technologie	Facteur A
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

Le courant de saturation de référence est donné par l'équation suivante:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{co}}{N_s A K T_c}\right) - 1} \quad [II - 11]$$

Ou

N_s : nombre des cellules en série d'un module PV

I_{sc} : est le courant de court-circuit

V_{co} : est la tension en circuit ouvert

II.5 .Modélisation d'un module photovoltaïque

Une cellule PV typique produit moins de 2W à 0,5V environ; les cellules doivent être connectées en série-parallèle sur un module pour produire suffisamment de puissance. Une

matrice PV est un groupe de plusieurs modules PV qui sont connectés électriquement en série et en parallèle pour générer le courant et la tension requis. Le circuit équivalent pour un module solaire disposé d'un nombre N_s des cellules montées en série et d'un nombre N_p des cellules montées en parallèle est représenté sur la figure [22]

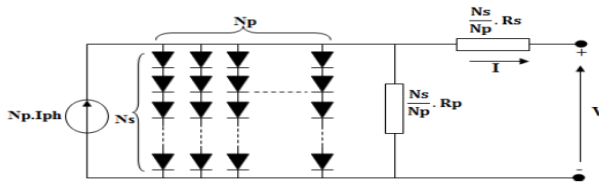


Figure II.6.module générale de panneau PV

L'équation terminale pour le courant et la tension d'un module PV devient la suivant[27]:

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_s \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I \times R_s}{N_p} \right)}{K T_c A} \right) - 1 \right] - \frac{\left(\frac{N_p \times V}{N_s} + I R_s \right)}{R_p} \quad [II - 12]$$

Dans cet chapitre, nous avons utilisé la cellule PV de type **YL245P-29b** pour la modélisation. Le générateur PV comporte **4092** modules connectés en série et **192** modules connectés en parallèle et le nombre de panneaux par sous champ est **4092** panneaux pour une puissance total de **1039368** W. Le nombre total des panneaux de la centrale est **81840** panneaux soit une puissance crête total de **20787360** W (**20.7** MW). Le module PV comporte **60**cellules connectées en série pour offrir une puissance de**245W**. Le tableau.II.2montre les différentsparamètres du module PVde type **YL245P-29b** sous conditions standard $T=25C^\circ$ et $G=1000W/m^2$

Tableau II.2. Les Caractéristique de module PV de type YL245P-29utilisé en simulation

Caractéristiques	Symbole	Unité	Paramètre
Nombre de panneaux en série	N_s	Sans unité	60
Courant de court- circuit I_{cc}	I_{cc}	A	8.83 A
Tension de circuit ouvert V_{co}	V_{co}	V	37.5 v
Nombre de panneaux en parallèle	N_p	Sans unité	1
Puissance maximale p_{max}	P_{max}	W	245.0 W
Tension à p_{max}	V_{max}	V	29.6 V
Courant à p_{max}	I_{max}	A	8.28A
Coefficient de température α_{Icc}	K_i	mA/C°	0.062

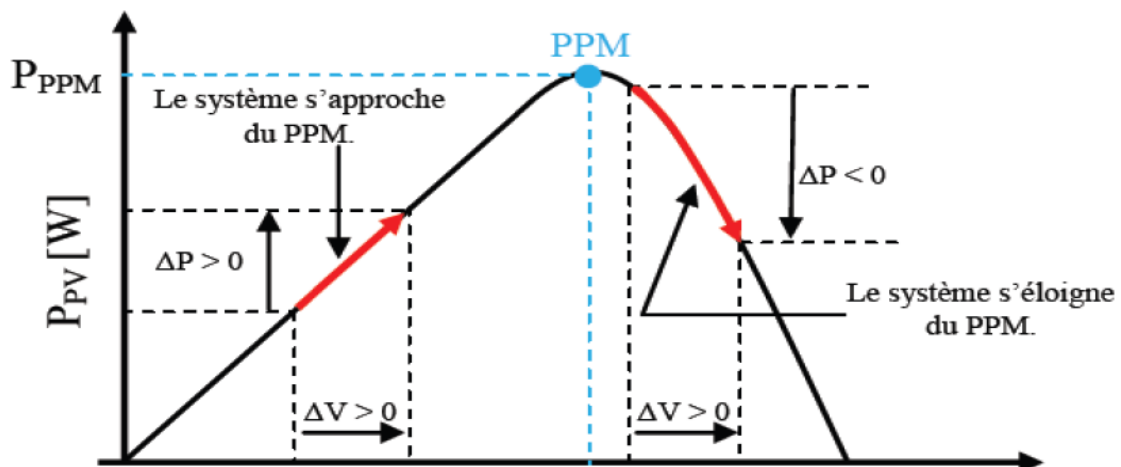
II.6.Optimisation de la puissance des modules PV

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. Pour déterminer le point de puissance maximum on a plusieurs organigrammes (MPPT) ont été développés et largement comme suit:[28]

1. Organigramme de l'algorithme P et O (perturber et observer)
2. Organigramme de l'algorithme I N C (increment de la conductance)
3. Organigramme de l'algorithme F C O (la mesure de la fraction de la tension V_{co})
4. Organigramme de l'algorithme F C C (la mesure d'une fraction de la courant I_{cc})
5. Organigramme de l'algorithme L F (logique floue)

II.6.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée .cette méthode base sur la relation entre la puissance de module PV avec à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens oppose, comme montré sur les figures (II.8) et (II.9):[29]



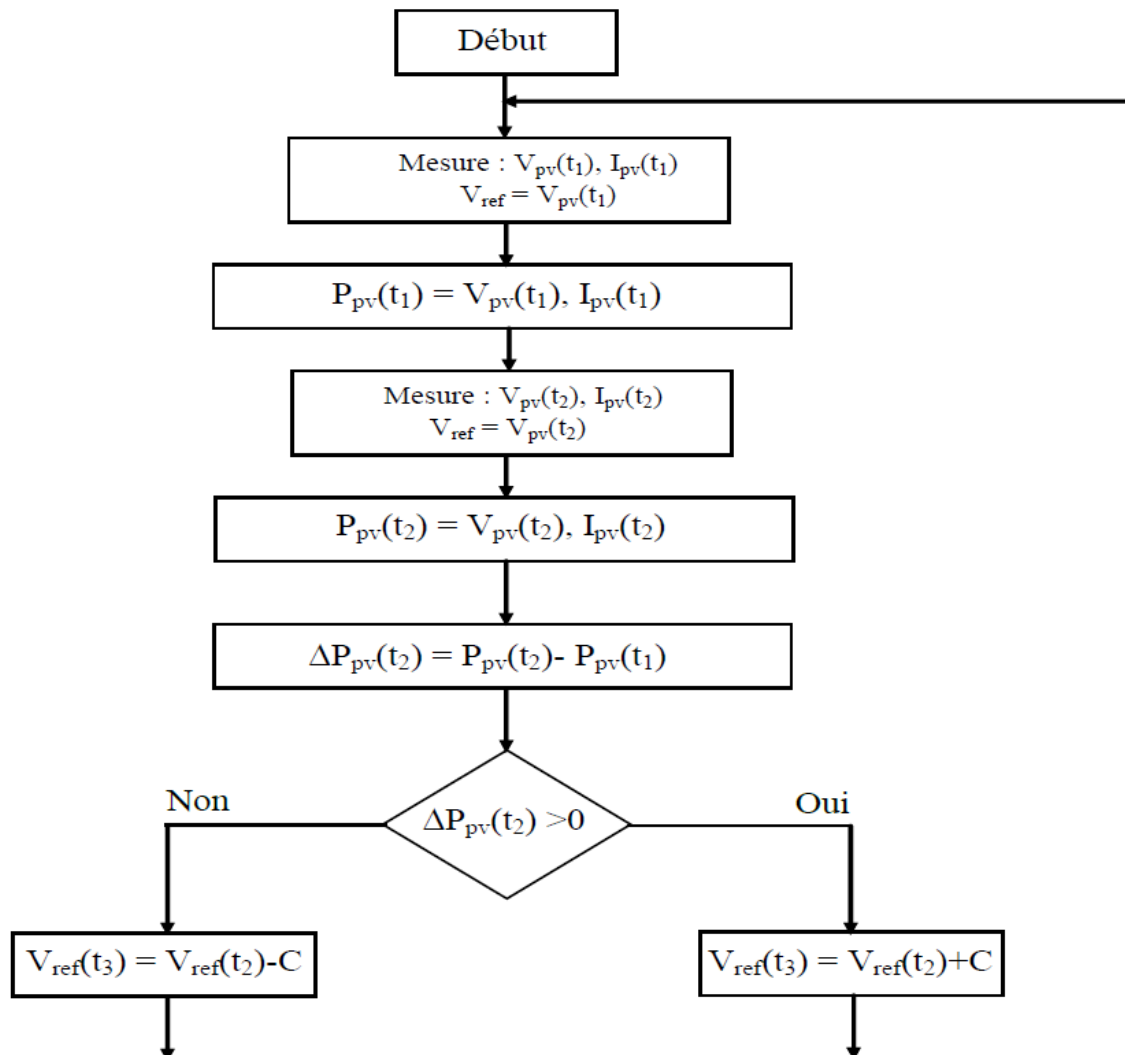


Figure II.8. Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O)

II.6.2. Méthode de conductance incrémentale (INC)

pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle on a deux grandeurs physiques importants sont le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension. Son principe consiste à comparer entre la conductance ($G_{inc} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) et de sa dérivée ($\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{ov}}$) ce –t-à-dire quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d’atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ($\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$), comme la montre la figure (II.10) [30]

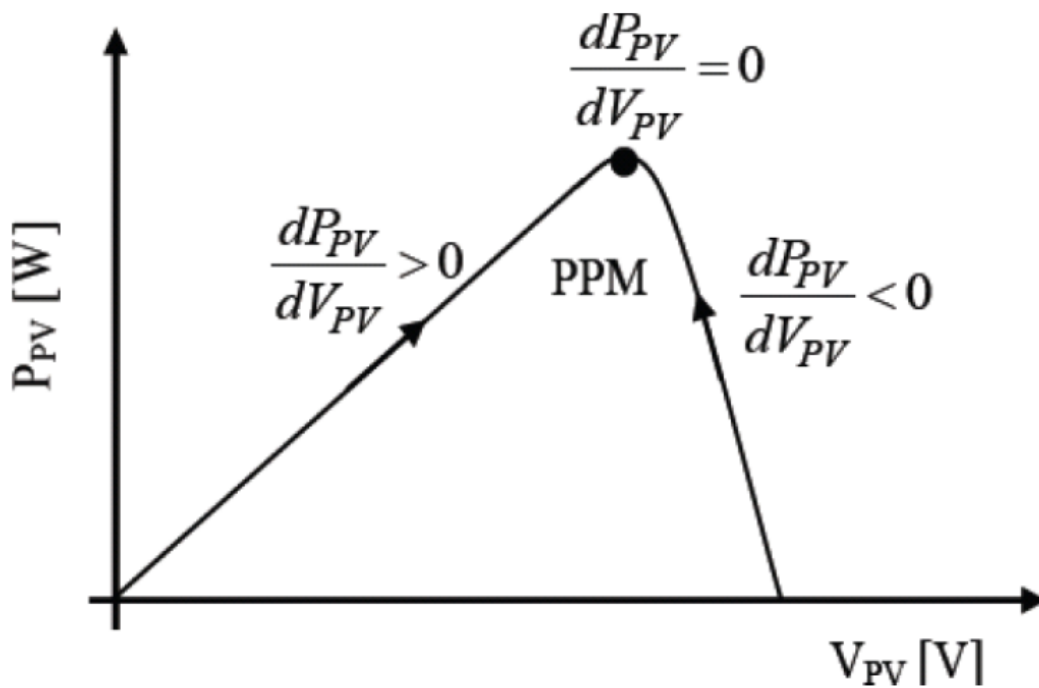


Figure II.9. Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe ($\frac{dP}{dV}$) sur la caractéristique de la puissance

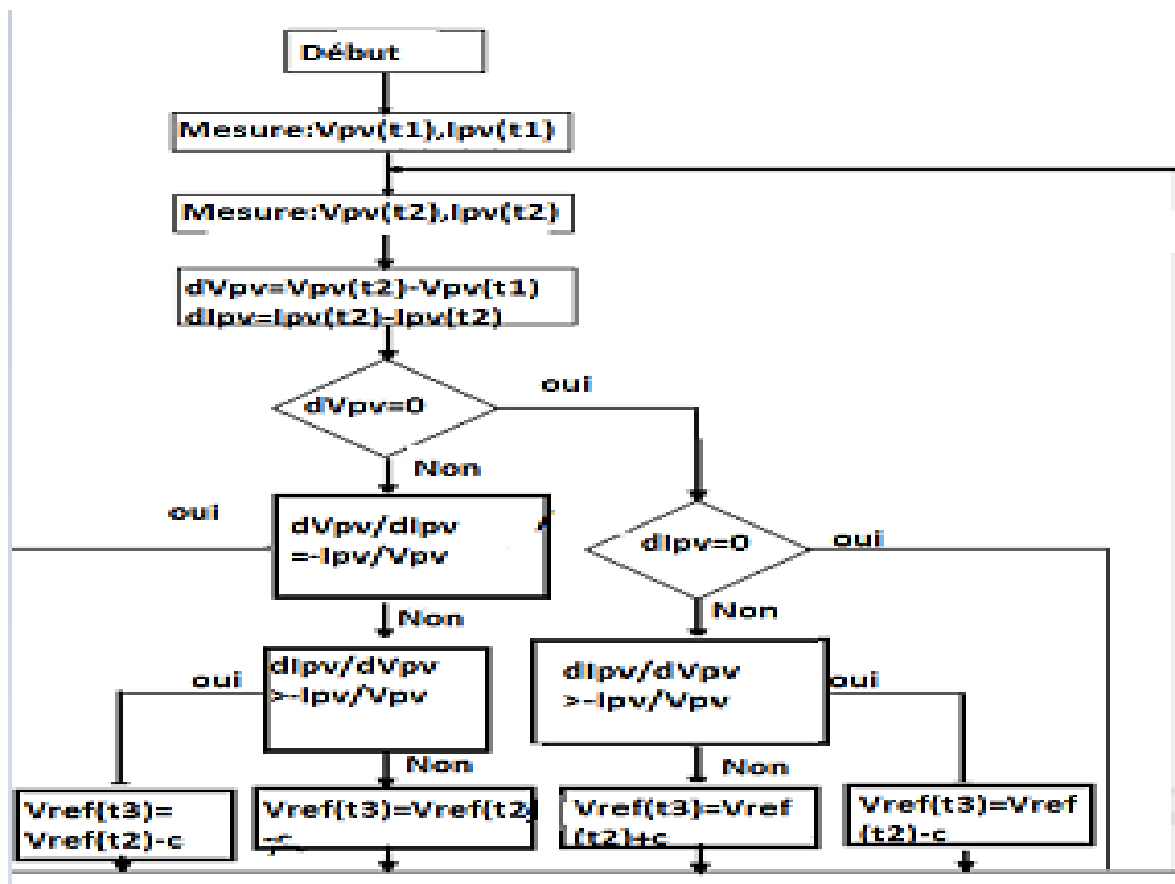


Figure II.10. Organigramme de la méthode conductance incrémentielle

II.6.3.Méthode de fraction du courant I_{cc} (F C C)

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :[31]

$$I_{op} = KI_{cc}$$

K:est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

II.6.4.Méthode d'une Fraction de la Tension V_{oc}

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :[32]

$$V_{op} = KV_{co}$$

Ou :

K: est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

II.7. Modélisation d'un système photovoltaïque

La modélisation de système PV est défini comme le schéma suivant

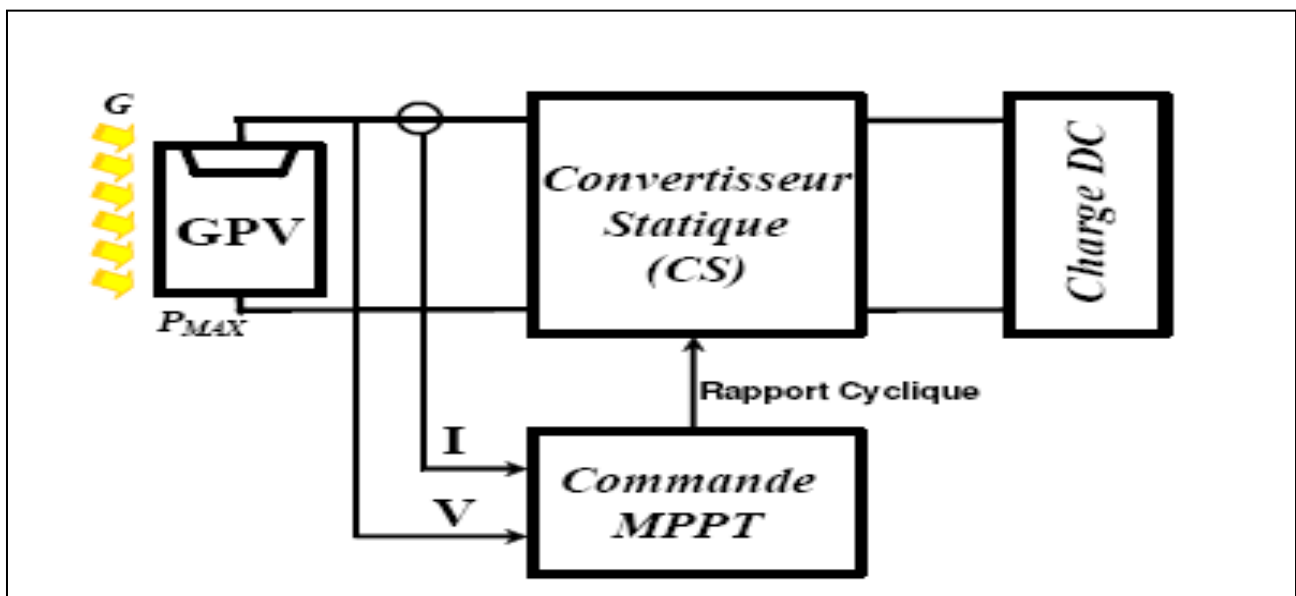


Schéma II.11. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande

II.7.1.Modélisation de générateur photovoltaïque

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right)$$

Alors Par conséquent, l'équation (II.7) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}}$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right)$$

D'ou:

$$I_s = I_{sc} e^{\frac{V_{oc}}{V_{th}}}$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sh} \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I R_s}{V_{th}}}\right)$$

Cette expression est très pratique donc Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent N_p branches en parallèle, chacune avec N_s cellules connectées en série. Donc le courant I_p , généré par le module PV sera exprimé par:

$$I_p = N_p I_{sc} \left(1 - e^{(V_p - N_s V_{oc} + \frac{N_s}{N_p} R_s I_p)/V_{th}}\right)$$

II.7.2. Modélisation d'un convertisseur Boost (hacheur survolteur)

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est un composant indispensable d'un système solaire photovoltaïque autonome caractérisé par son rapport cyclique d ($0 < d < 1$). Il est utilisé pour convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

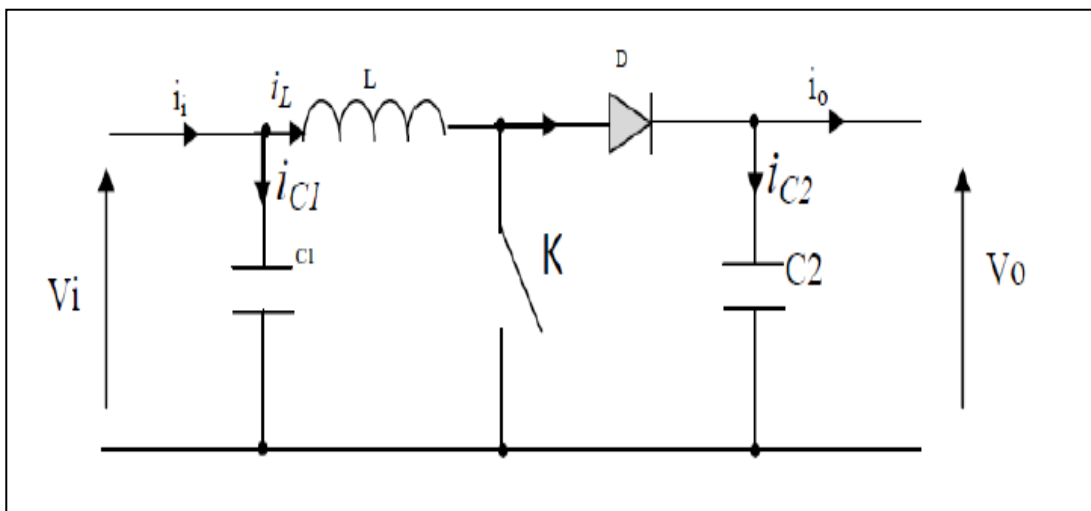


Figure II.12. schéma représenté la convertisseur statique boost

Pour trouver les fonctions du convertisseur survolteur à l'état d'équilibre,

il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur k comme le schéma suivant

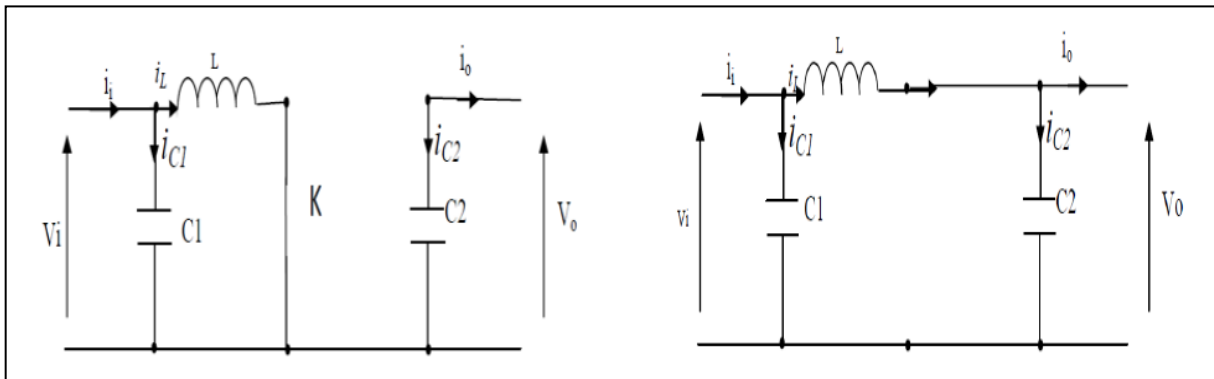


Figure II.13. schéma représenté les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur k

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement, on aura les deux systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période $[0 \quad dT]$:

L'interrupteur commande est fermé ,la diode est ouverte et la bobine stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée,on aura:

$$i_{c1}(t) = i_i(t) - i_L(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \quad [\text{II.13}]$$

$$i_{c2}(t) = -i_o = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \quad [\text{II.14}]$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \quad [\text{II.15}]$$

Pour le second période $[dT \quad T]$:

L'interrupteur commande est ouvert,la diode devient passante , la bobine restitue alors son énergie à la charge .on aura:

$$i_{c1}(t) = i_i(t) - i_L(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \quad [\text{II.16}]$$

$$i_{c2}(t) = i_L(t) - i_o(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \quad [\text{II.17}]$$

$$V_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad [\text{II.18}]$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes . Le système d'équations devient :

$$i_0 = (1 - d)i_1 \quad [\text{II.19}]$$

$$i_i = i_1$$

$$V_i = (1 - d)V_0 \quad [\text{II.20}]$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_0 et I_0) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_i et I_i) en fonction du rapport cyclique " d".

$$V_0 = \frac{V_i}{1-d} = \frac{V_{pv}}{1-d} \quad [\text{II.21}]$$

$$i_0 = (1 - d)i_i = (1 - d)i_{pv} \quad [\text{II.22}]$$

Alors Le rapport de conversion (rapport cyclique) est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit:

$$M = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-d} \text{ tell que } d < 1 \quad [\text{II.23}]$$

Donc le boost survolteur est bien élévateur de tension.

II.7.3 Le command MPPT (Commande pour la recherche du point de puissance maximale)

Le système de recherche du point de puissance maximum est un convertisseur DC vers DC c'est-à-dire un appareil qui convertit le courant continu en courant continu.

La recherche du point de puissance maximum (MPPT) est intégralement réalisée de façon électronique, sans aucun dispositif ou système mécanique.

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence, la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie.

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

- le panneau peut délivrer à la batterie
- la batterie est capable de recevoir

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension la plus adaptée afin de fournir une intensité optimale pour la batterie.

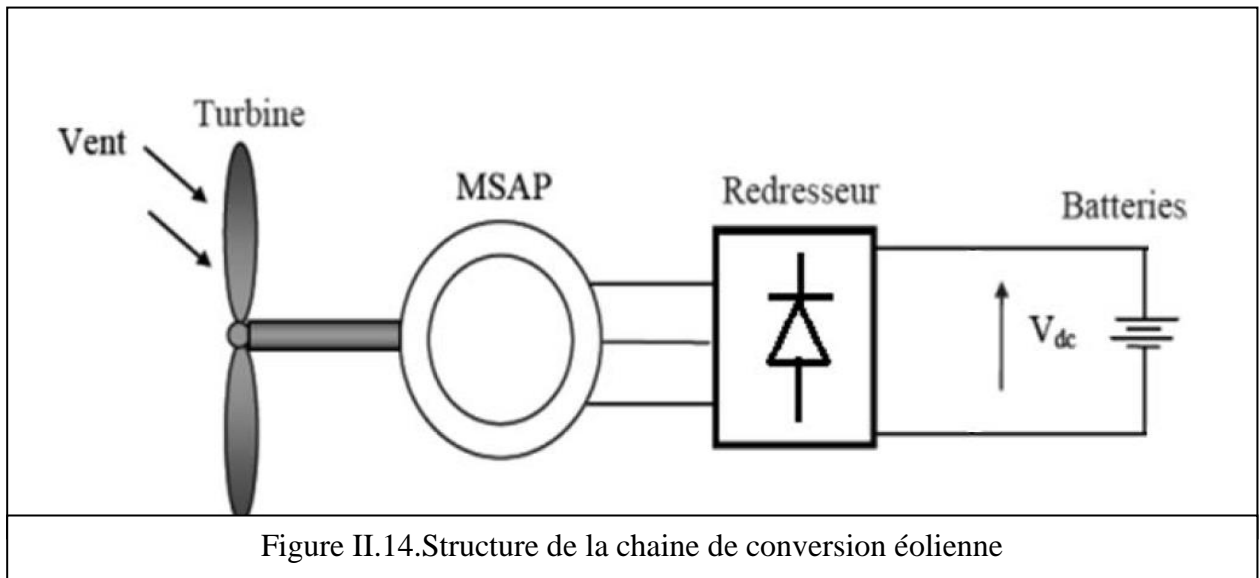
La méthode P&O est la plus simple pour faire une recherche du MPP. L'objectif est de maximiser P, en augmentant au maximum la tension U sans faire baisser l'intensité I.

Le regulateur MPPT fonctionne avec des frequences audio tres elevees, generalement situees dans la plage des 20-80 kHz. L'avantage des circuits hautes frequences est qu'ils peuvent etre concus avec des transformateurs tres efficaces de petite taille.

Partie II modélisation de système éolien

II.8. Structure de la chaine de conversion éolienne

La structure de la chaîne de conversion éolienne est représentée sur la figure (II.1) suivante :



II.9. Modélisation de la chaine de conversion éolienne

II.9.1. Modélisation du vent

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Par définition la vitesse de vent est la grandeur d'entrée d'un système de conversion éolienne. Elle est représentée sous forme d'une fonction scalaire temporelle $V_v = f(t)$. La vitesse de vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmonique :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t)) \quad [\text{II-24}]$$

$$\begin{aligned} V_v(t) = & 9 + 0.2 \sin(0.1047t) & [\text{II-25}] \\ & + 2 \sin(0.2665t) \\ & + \sin(1.2930t) \\ & + 0.2 \sin(3.6645t) \end{aligned}$$

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S (V_v)^3 \quad [\text{II-26}]$$

Avec:

ρ : est la densité d'air [Kg.m^{-3}], soit 1.2 Kg.m^{-3} à 20C°

$S = \pi R^2$: Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle [m^2]. où R désigne le rayon du rotor en mètres.

V_v : Est la vitesse du vent [m/s].

II.9.2. Modélisation de la turbine éolienne

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

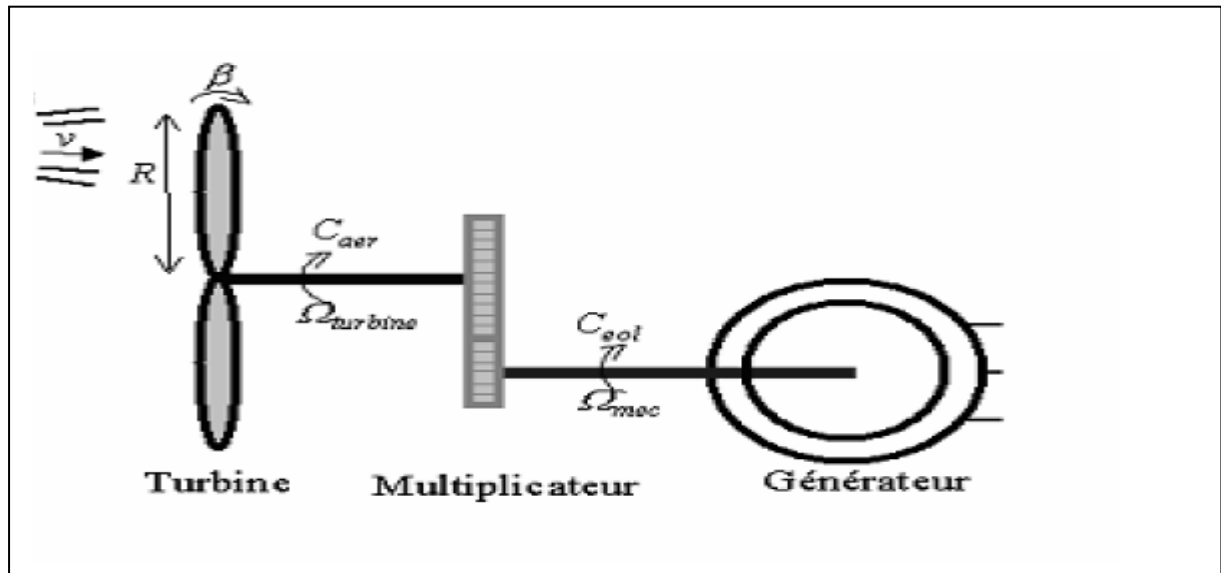


Figure II.15. Figure présentée la turbine éolienne

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_{aer} = C_p \cdot P_u = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S (V_v)^3}{2}$$

Le coefficient de puissance C_p indique le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par :

$$C_p = \frac{2P_t}{\rho S (V_v)^3} \quad [\text{II.27}]$$

Avec:

P_t : la puissance de la turbine éolienne est calculée ainsi :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S (V_v)^3 = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S (V_v)^3 \quad [II.28]$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad [II.29]$$

Ou $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de turbine

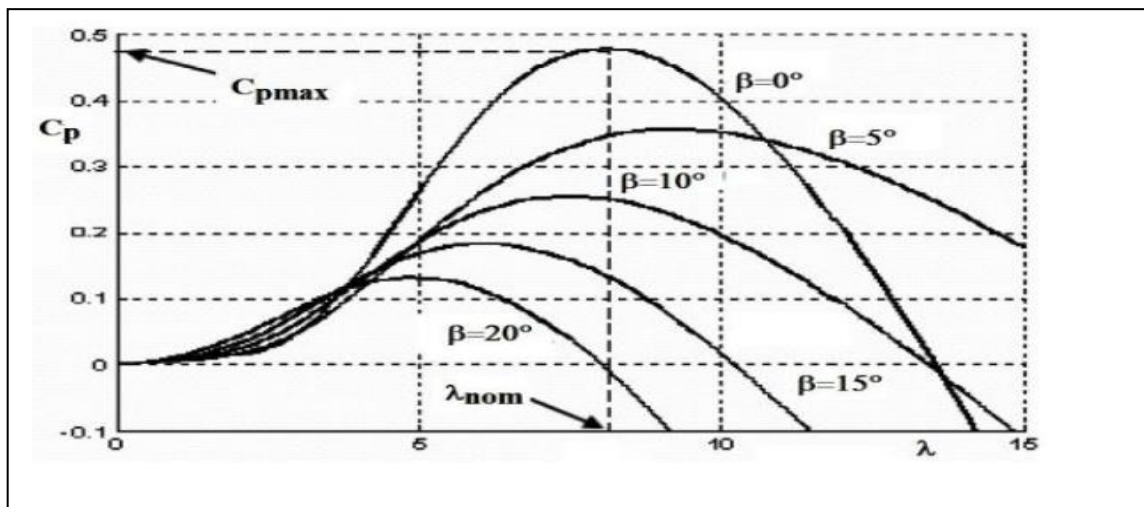


Figure II.16.Coefficient de puissance pour différents angles de calages

Le couple aérodynamique est donné par la formule suivante :

Le multiplicateur est le lien entre la turbine et le générateur. Il sert à adapter la vitesse la plus rapide de la génératrice à celle la plus lente de la turbine, il est souvent modélisé par les deux équations suivantes:

$$T_t = \frac{T_{em}}{G} \quad [II.30]$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad [II.31]$$

-G est le gain du multiplicateur.

- T_{em} , le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone,

- T_t , le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

- Ω , est la vitesse mécanique de la génératrice.

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{G^2} = \sum C = C_T - C_{vis} \quad [II.32]$$

J est l'inertie totale:

$$J = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_{générateur}$$

C_{vis} : couple de frottement visqueux :

$$C_{vis} = \rho \Omega_{mec}$$

- couple totale qui égale à la superposition des couples de la génératrice et électromagnétique. L'équation de l'arbre mécanique devient alors :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_T = C_g - C_{em} \quad [II.33]$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine représenté sur la figure suivante:

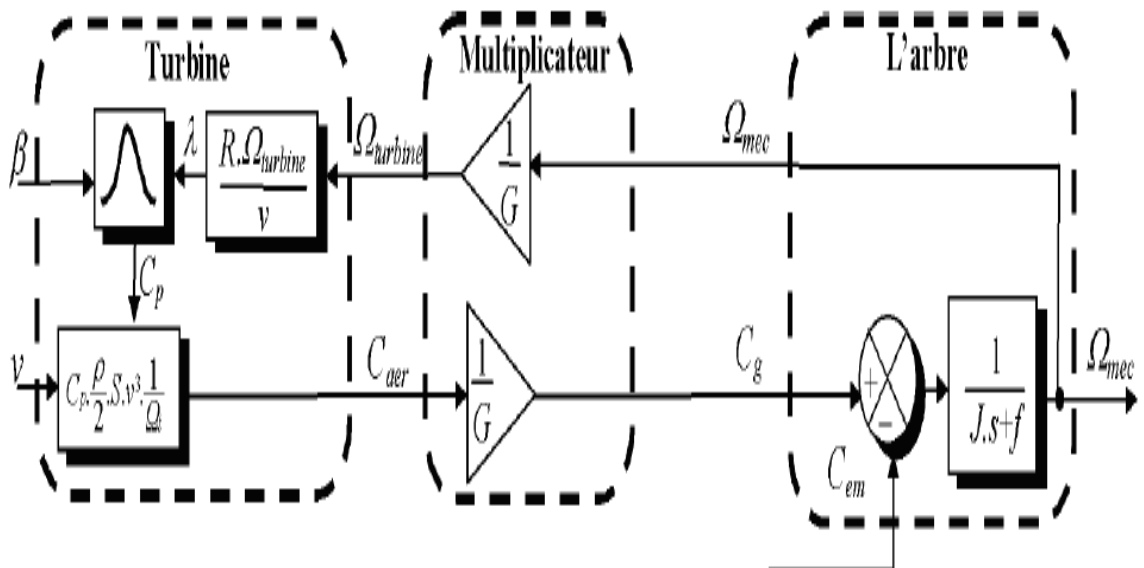


Figure II.17. Schéma bloc du modèle de la turbine

II.10.LES CONSTITUANTS DE LA CENTRALE EOLINNE KABERTENE :

La ferme éolienne de **KABERTENE**, est composée de **12 aérogénérateurs** (éoliennes) installée en parallèle de Marque **GAMESA** type **G52- 850** de **850 kW** de puissance chacune soit une puissance Totale de la Ferme de **10,2 MW** et un tension nominale **690V**, plantée sur la hauteur du mat **55m** avec chacun éolienne composée de 3 pales, d'une longueur de **26 m** et de **12 transformateurs** et un seule onduleur pour alimentation de batterie à courant CD ,dans cette centrale on a **41batteries** . L'énergie produite par cette ferme est injectée au poste HTA **30 kV** **KABERTENE**,et on a un Salle de commande et contrôle ou se trouve le **SCADA** (system of control and data acquisition) et le système de détection d'incendie .

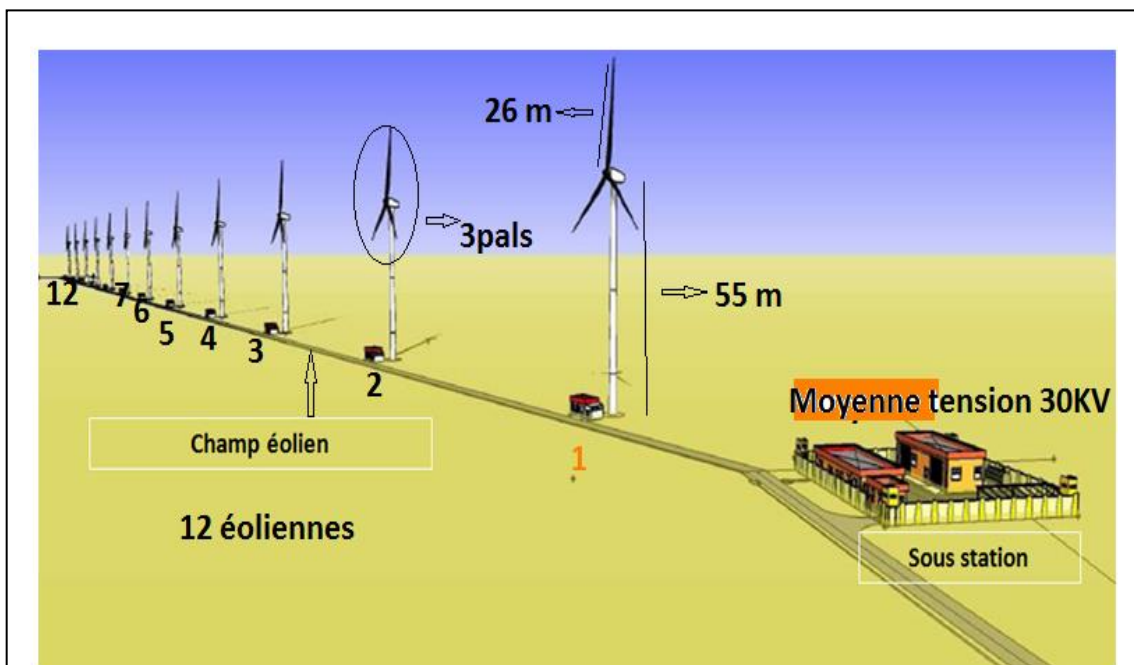


Figure II.18.LES CONSTITUANTS DE LA CENTRALE EOLINNE KABERTENE

II.11. Caractéristique d'Aérogénérateur Centrale KABERTENE:

Désignation	Caractéristique
Nombred'éoliennes	12(type G52)
Nombre de pales	3pales par éolienne d'une longueur de 26m
Fabricant	GAMESA (Espagne)
Hauteur de mat	55m
Puissance unitaire	850 kw (à une vitesse nominale de 16m/s)
Evacuation d'énergie	Poste 220/30KV de Kabertene
Energieannuelleproduite	3.42GWh ($V_{moy}=8.5$ m/s .d.air :1.225 kg/m ³)
CO2 évité /an (*)	Environ 1000 tonnes
Puissance totaleinstallée	10.2 MW
Temperateur	45 C°
Tension nominale	690 V
Frequencenominale	50 Hz

Tableau II.3. Les caractéristique d'éolienne de type G52 dans Kabertene

II.12. Conclusion

Dans cette chapitre on présenté la modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque on basé sur les relations des grandeurs physique suivant :Photo-courant (I_{ph}), Courant diode (I_d), Le courant traversant la résistance shunt (parallèle) (I_{sh}) et Courant de sortie de cellule ainsi on fait la modélisation de système PV a partir de GPV, convertisseur boost et le command MPPT ,dans autre partie en fait la modélisation d'un éolienne on basé sur la modélisation de vitesse de vent et de turbine éolienne .

CHAPITRE 3

Simulation des Résultats et Discussion de Système photovoltaïque et éolienne

III.1.Introduction

L'étude du système photovoltaïque (PV) d'une manière efficace nécessite une connaissance précise des courbes caractéristiques I-V et P-V des modules. Dans ce chapitre, nous présentons la simulation du module PV. Le modèle a été sélectionné sur la base d'un modèle mathématique du module PV qui est basé sur celui d'une cellule solaire PV élémentaire et ensuite la simulation de l'énergie éolienne. Ce chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus en utilisant l'environnement "Matlab/Simulink" et en appliquant les relations cités dans le chapitre précédent.

III.2.L'environnement MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink sont des produits de Math Works Inc; ils sont utilisés pour le développement de techniques de calcul et de la conception basée sur les modèles. MATLAB est destiné essentiellement à réaliser des calculs mathématiques. Cet environnement graphique est une plateforme de simulation multi-domaines basée sur les flux de signaux d'entrée et de sortie.

III.3.Création du modèle de la cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink

pour faire la création du modèle de la cellule photovoltaïque il faut suivre les étapes suivantes:

- Lancer Matlab et créer votre répertoire de travail (current folder).

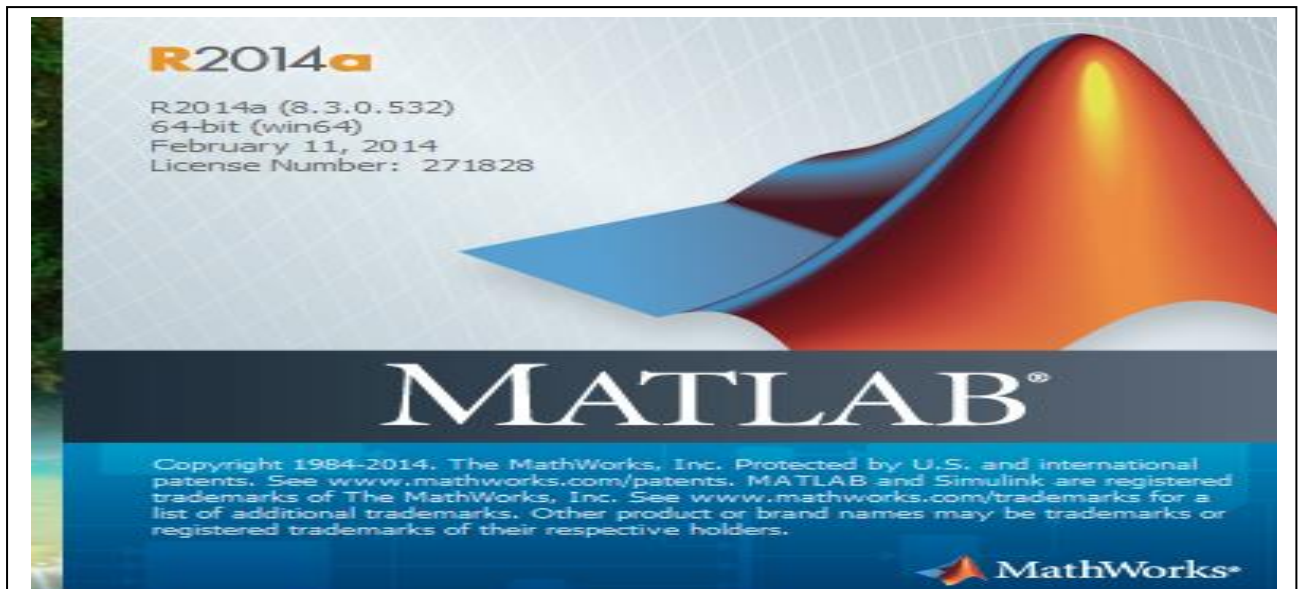


Figure III.1.Lancer Matlab

Aller dans file et new model, une fenêtre doit apparaître et elle va nous permettre notre modèle de cellule photovoltaïque.

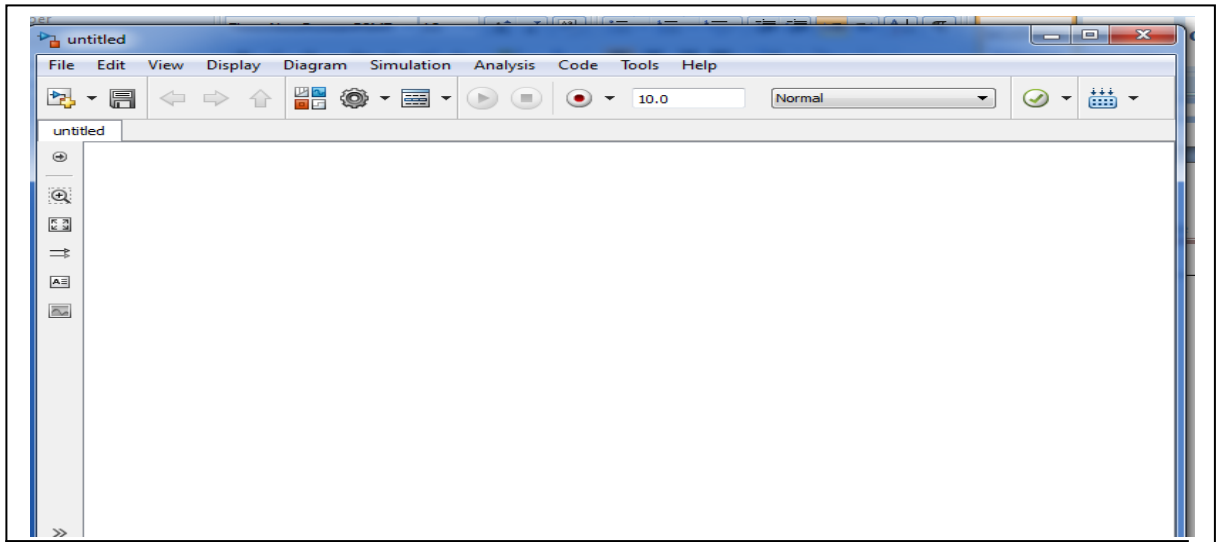


Figure III.2.Lancer Simulink

Pour concevoir notre modèle dans le Simulink, nous suivons les étapes illustrés sur les figures ci-dessous

Etape 1:

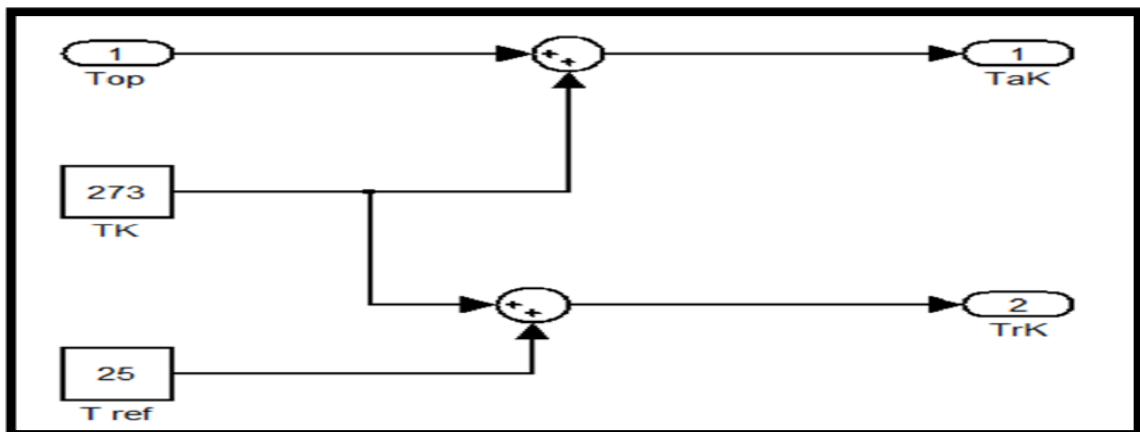


Figure III. 3. Circuit sous-système 1

Etape 2:

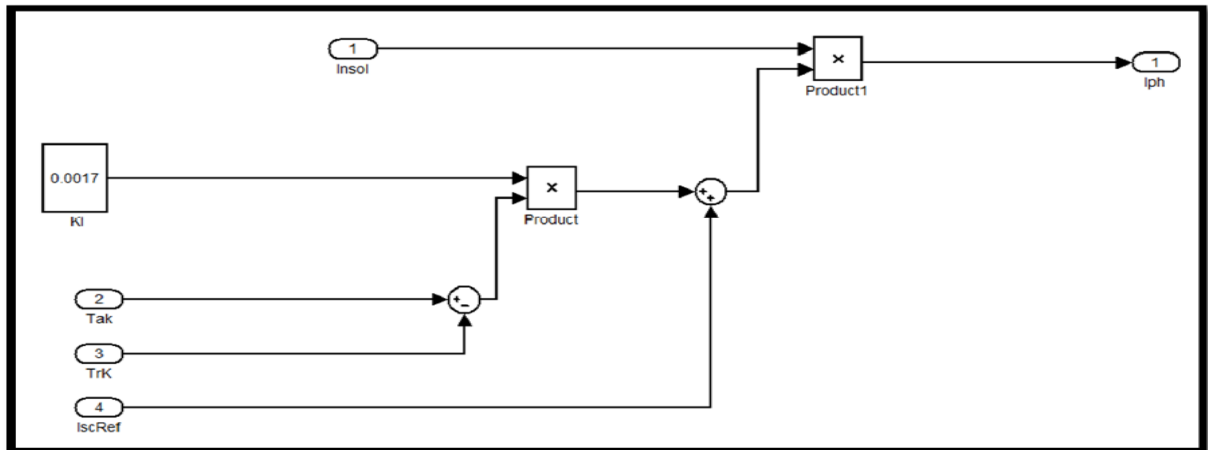


Figure III. 4. Circuit sous-système 2

Etape 3:

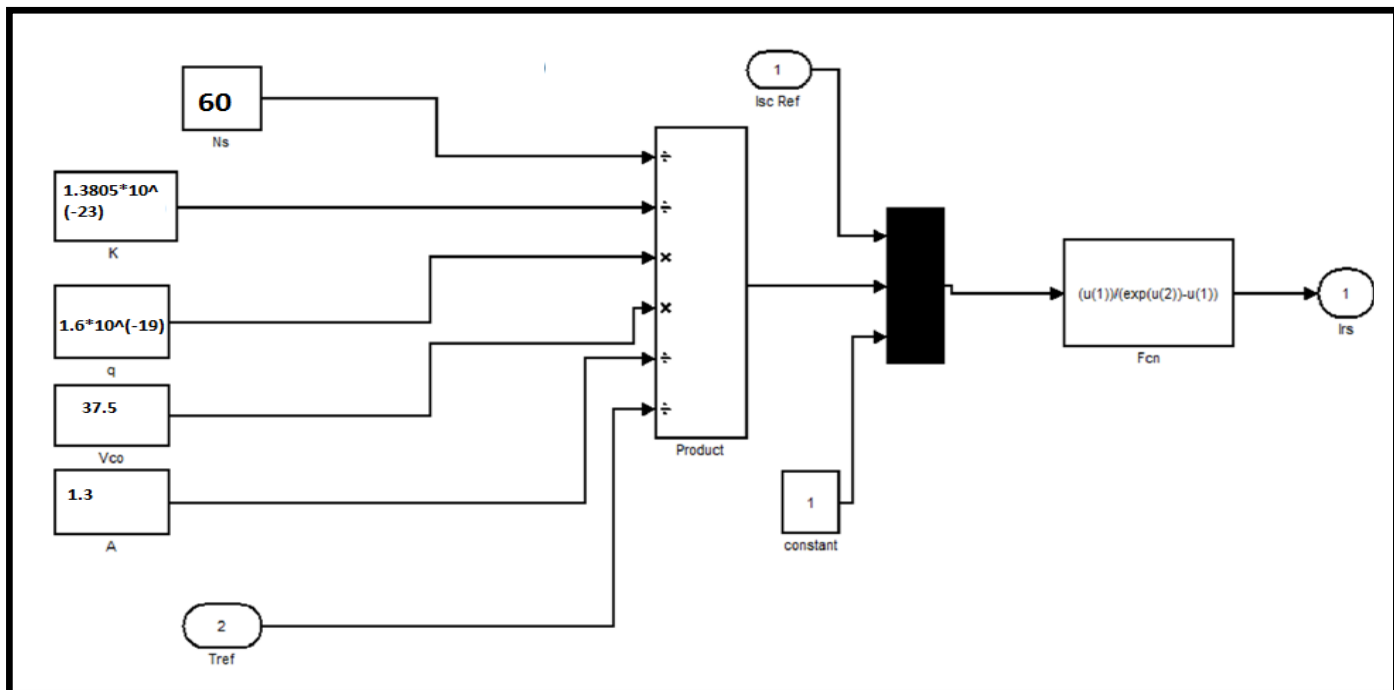


Figure III. 5. Circuit sous-système 3

Etape 4:

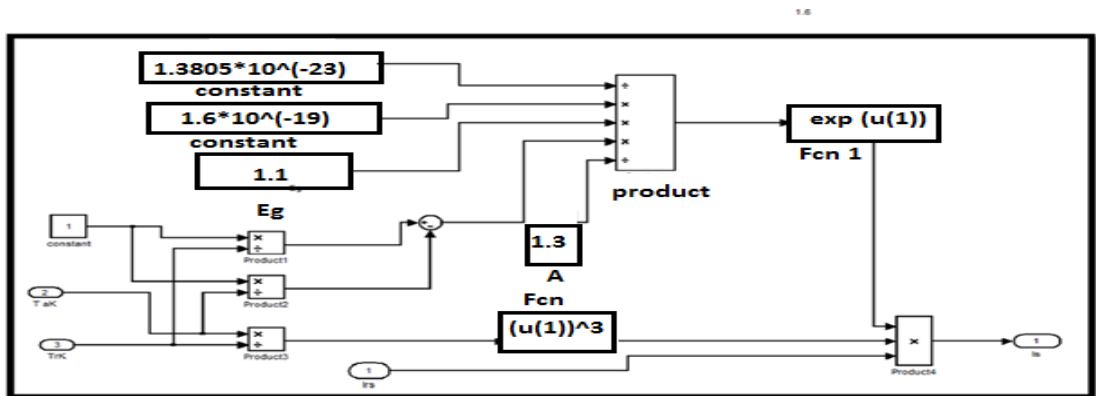


Figure III. 6. Circuit sous-système 4

Etape 5:

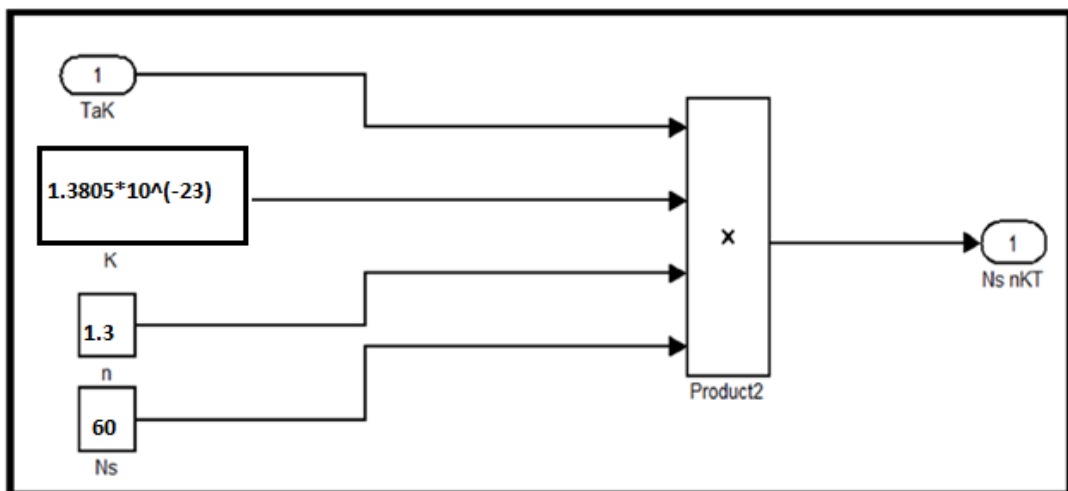


Figure III. 7. Circuit sous-système 5

Etape 6:

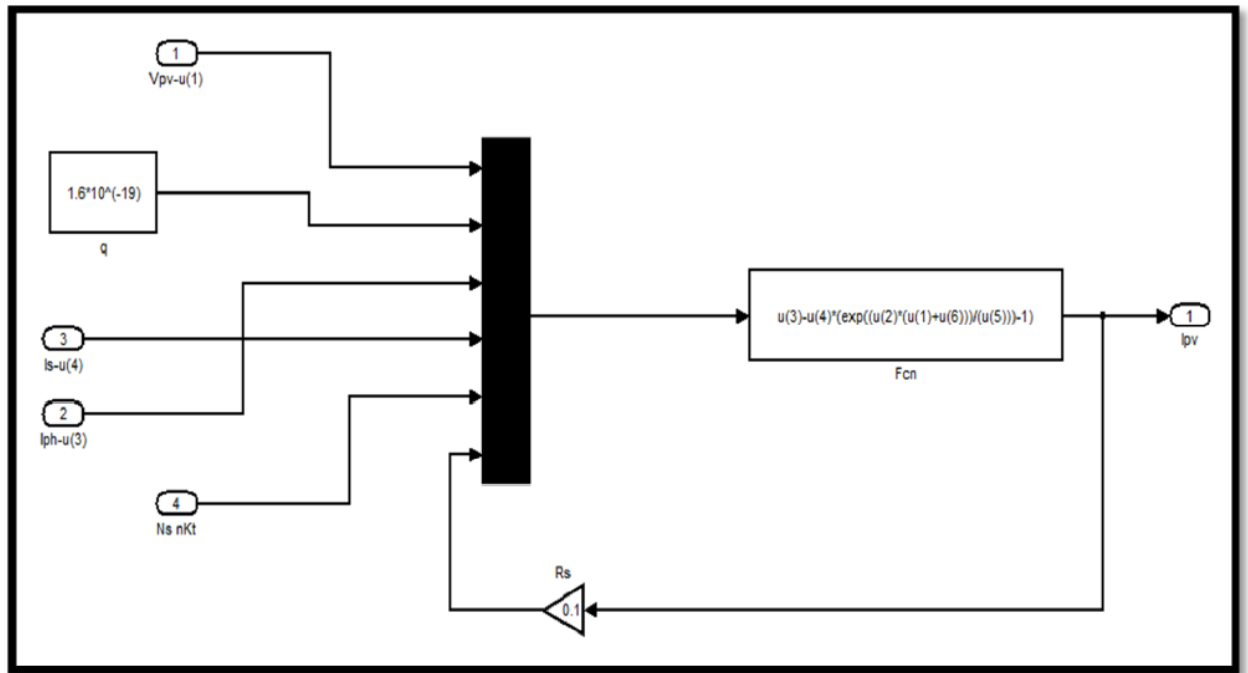


Figure III. 8. Circuit sous-système 6

Etape 7:

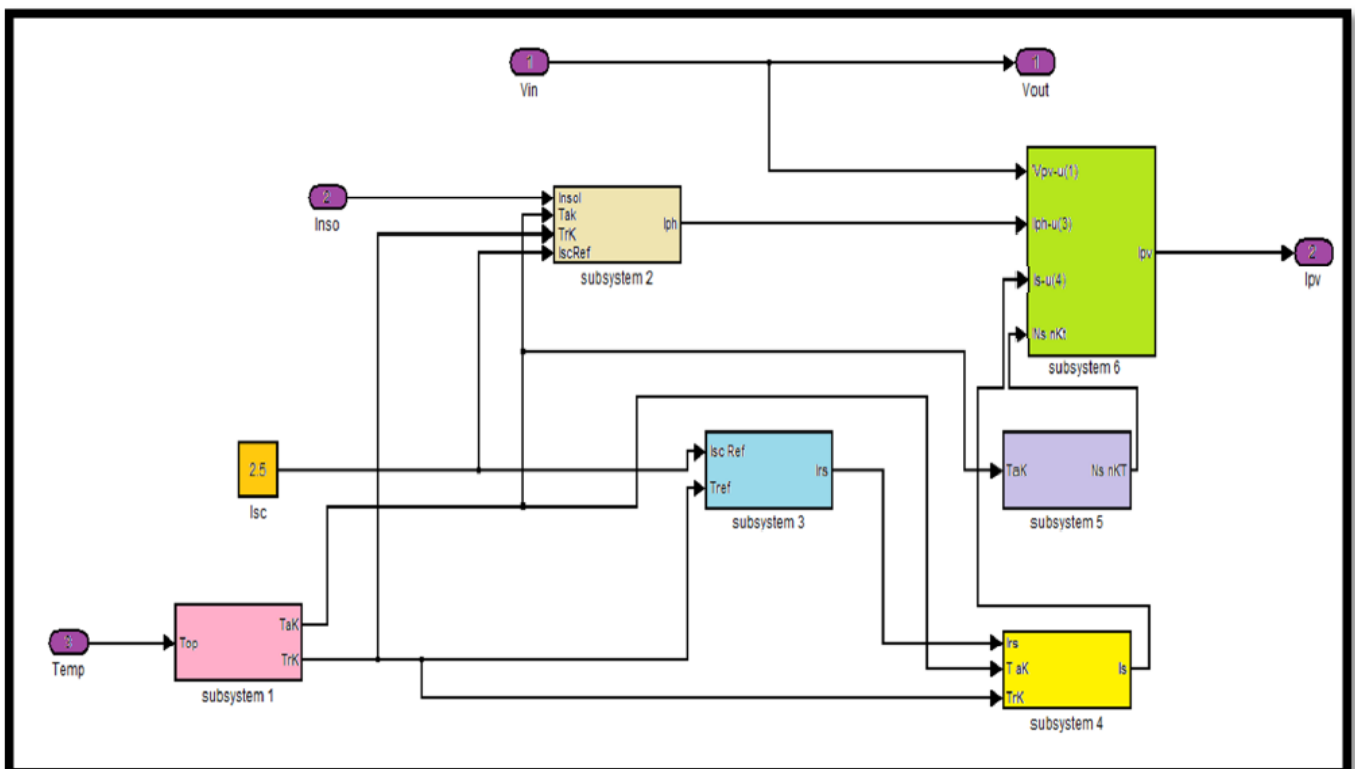


Figure III. 9. Interconnexion de tous les six sous-systèmes

Le modèle final est représenté sur la figure III. :

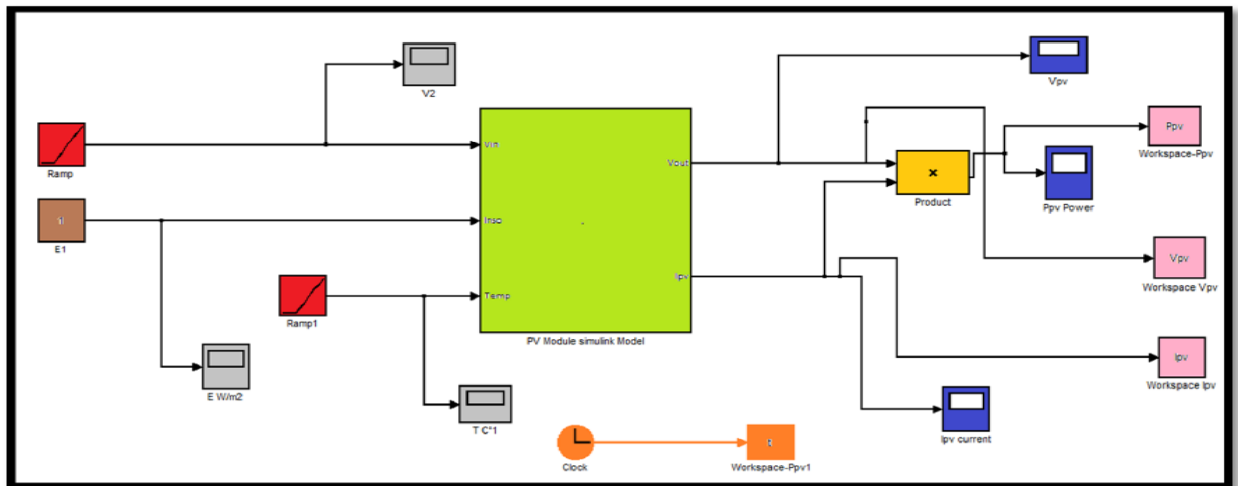


Figure III. 10. Modèle d'une cellule PV sous Simulink.

III.4. Résultats et discussions de simulation

III.4.1. Caractéristiques de la cellule PV

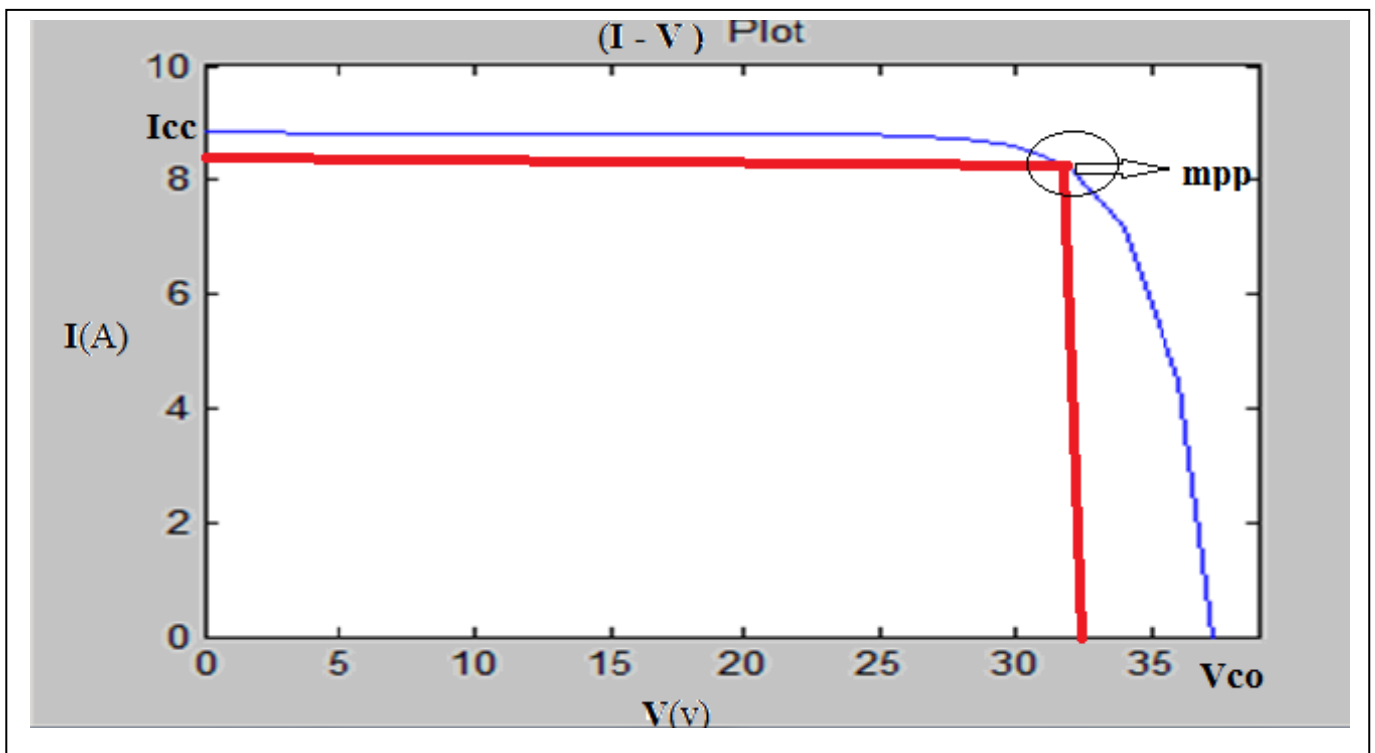


Figure III.11. Caractéristiques (I-V) de panneaux solaire de type YL245p-29b

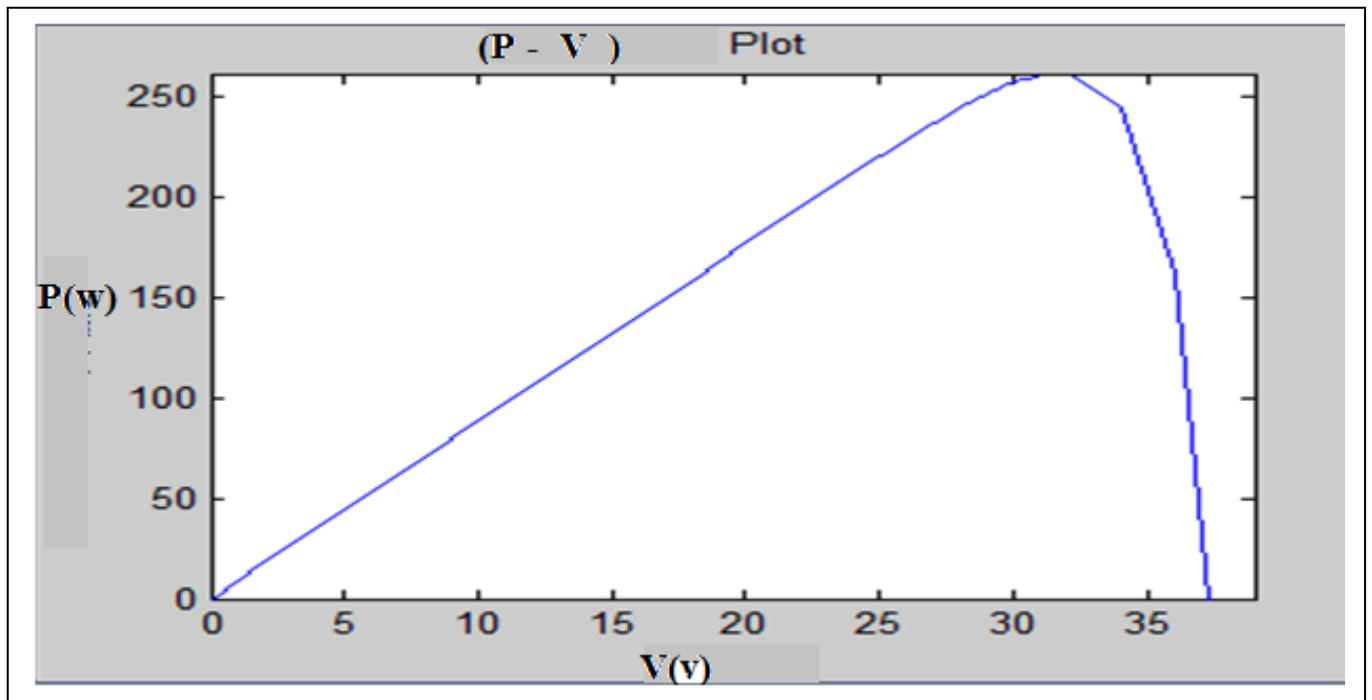


Figure III.12. Caractéristiques (P-V) de panneaux solaire de type YL245p-29b

III.4.2. Effet de la température sur un panneau photovoltaïque:

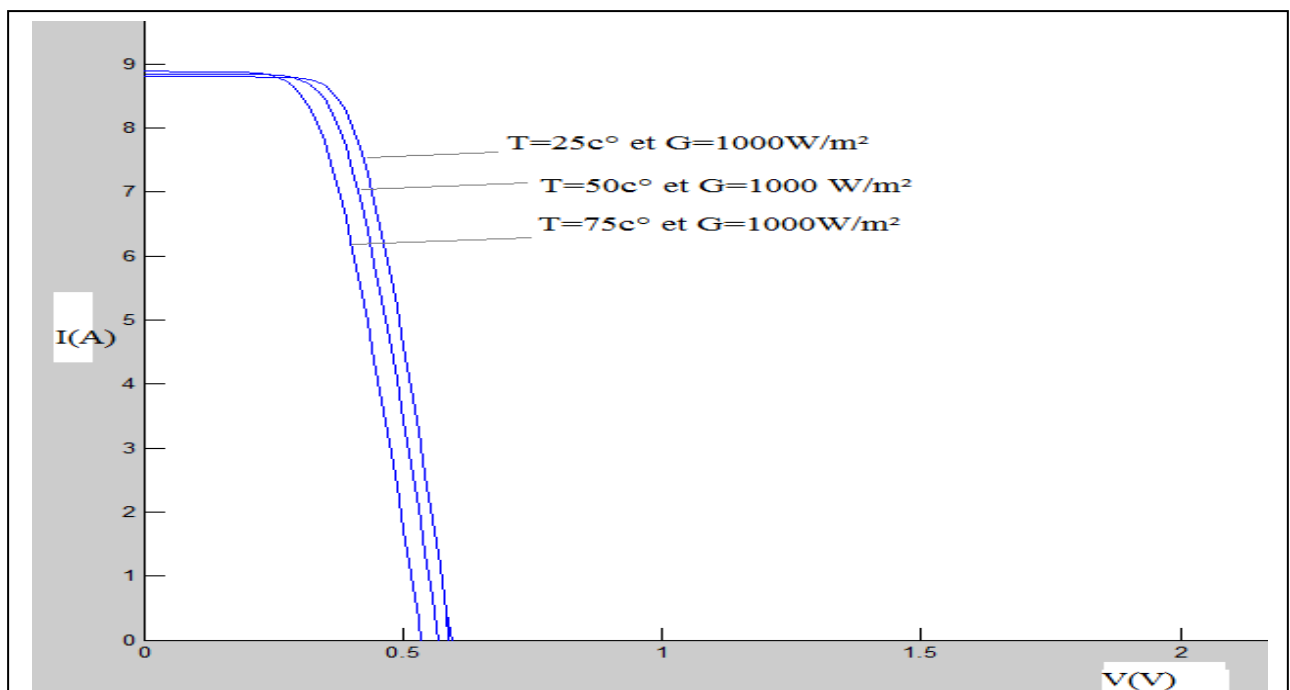
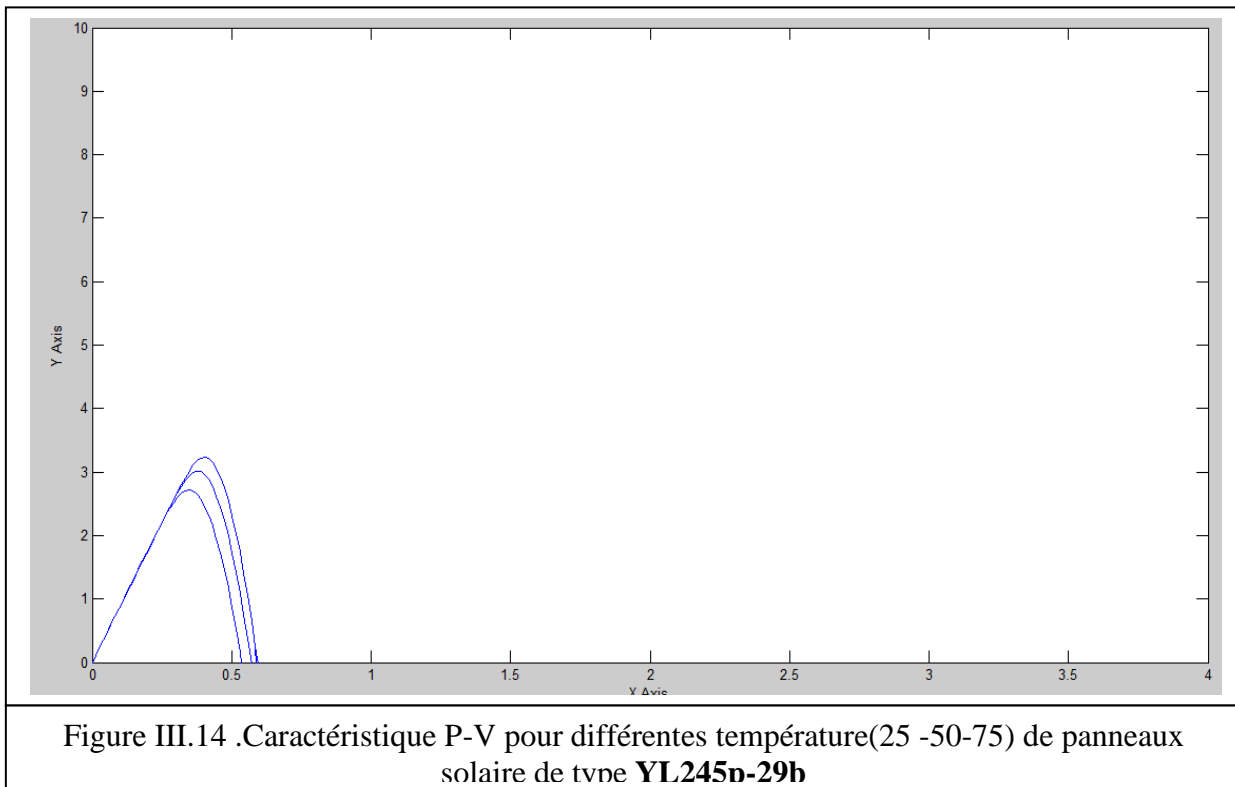


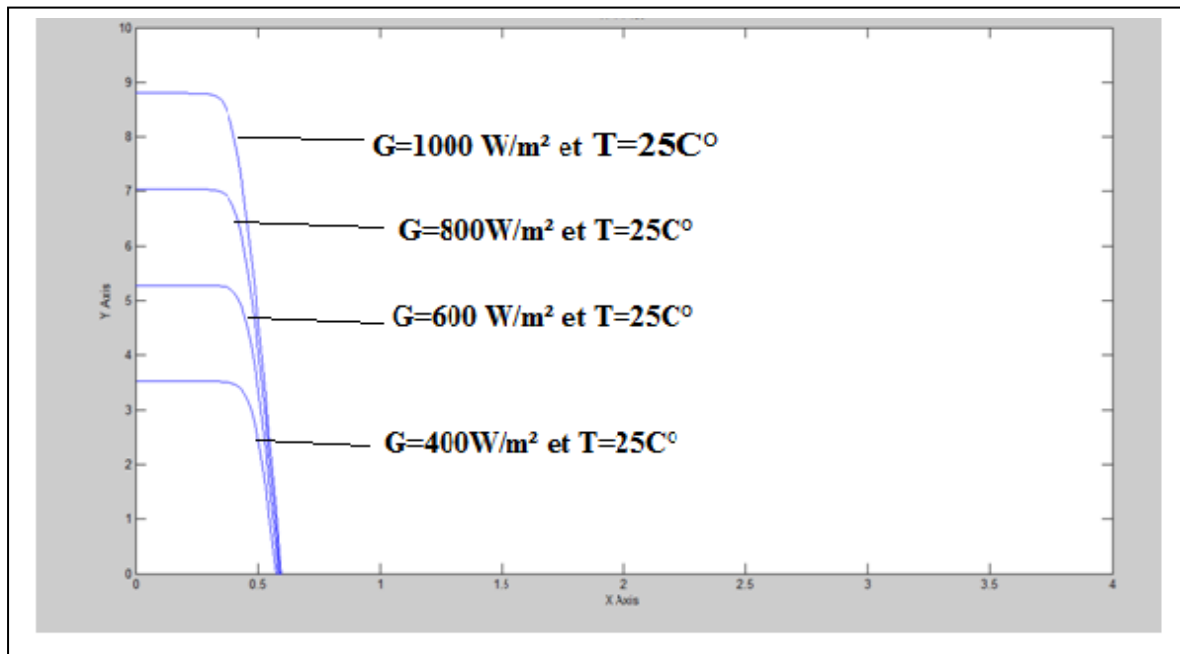
Figure III.13 . Caractéristique I-V pour différentes températures de panneaux solaire de type YL245p-29b

Dans la figure III.13, nous voyons l'impact de la température sur le courant I_{sc} qui croît avec la croissance de la température et le tension V_{oc} qui décroît.



D'après la figure III.14, la puissance délivrée par cellule subit une diminution qu'on estime d'environ -3.6% quand la température augmente par 10k

III.4.3. Effet de l'irradiation sur les caractéristiques I-V



On a vu d'après la figure III.15 que pendant la variation de l'irradiation le courant de court-circuit I_{sc} varie considérablement, par contre la tension de court-circuit V_{oc} est quasi

constante.

III.4.4. Groupement des cellules solaires

III.4.4.1 Module photovoltaïque

on utilise un autre module photovoltaïque, pour simuler les performances du module PV (groupement en série de n cellules identiques).

La représentation graphique de l'équation $I=f(V)$ pour un module constitué de 36 cellules en série est représenté sur le schéma suivant

Les grandeurs caractéristiques de ce module sont :

$V_{CO}=21,7$ volt, $I_{CC}=3.45$ A, , $P_{max}= 50,1$ W

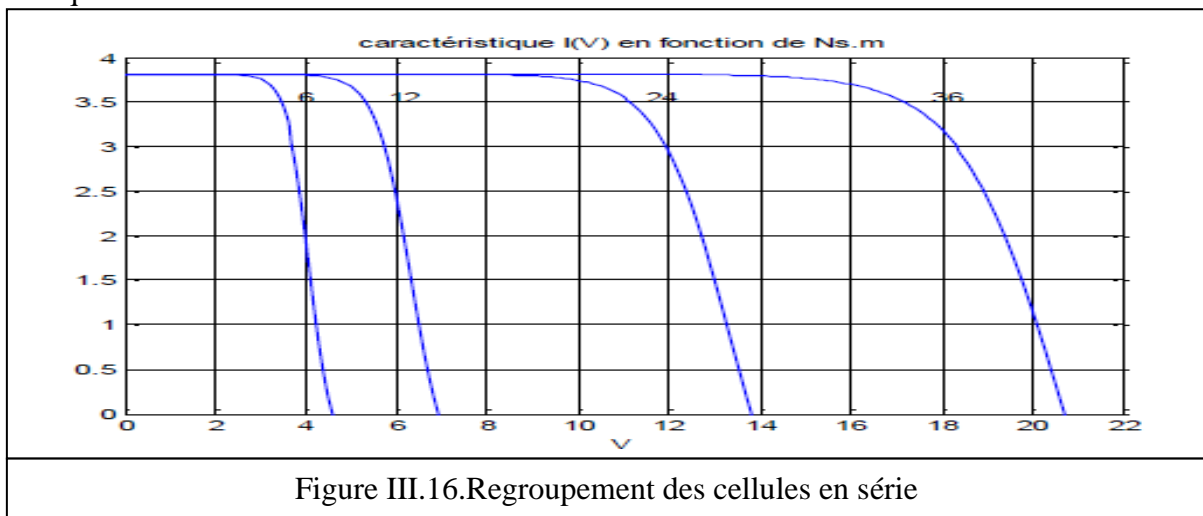
$V_m=,17.3$ $I_m=3.2$ A

III.4.4.2. Groupement en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La tension du circuit ouvert V_{oc} correspond linéairement à N_s (Nombre de cellules en série) comme la relation suivante :

$$V_{co} = 0.6 . N_s$$

Tel que 0.6 c'est la tension d'une cellule



III.4.5. L'influence de la résistance série R_s

L'existence de cette résistance au sein de la cellule solaire et liée à la résistivité des matériaux qui constituent le corps de la cellule, les contacts d'électrodes et la grille collectrice avant et arrière en plus le flux transversale du courant au niveau de l'émetteur de la cellule jusqu'à la grille[33]. La résistance série caractérise les pertes par effet joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

L'influence de la résistance série sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure III.17

III.4.6.L'influence de la résistance parallèle

La résistance shunt, cause des pertes au niveau du courant délivré par la cellule.

la valeur de Rsh est très grande par rapport la valeur de Rs

L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure III.18

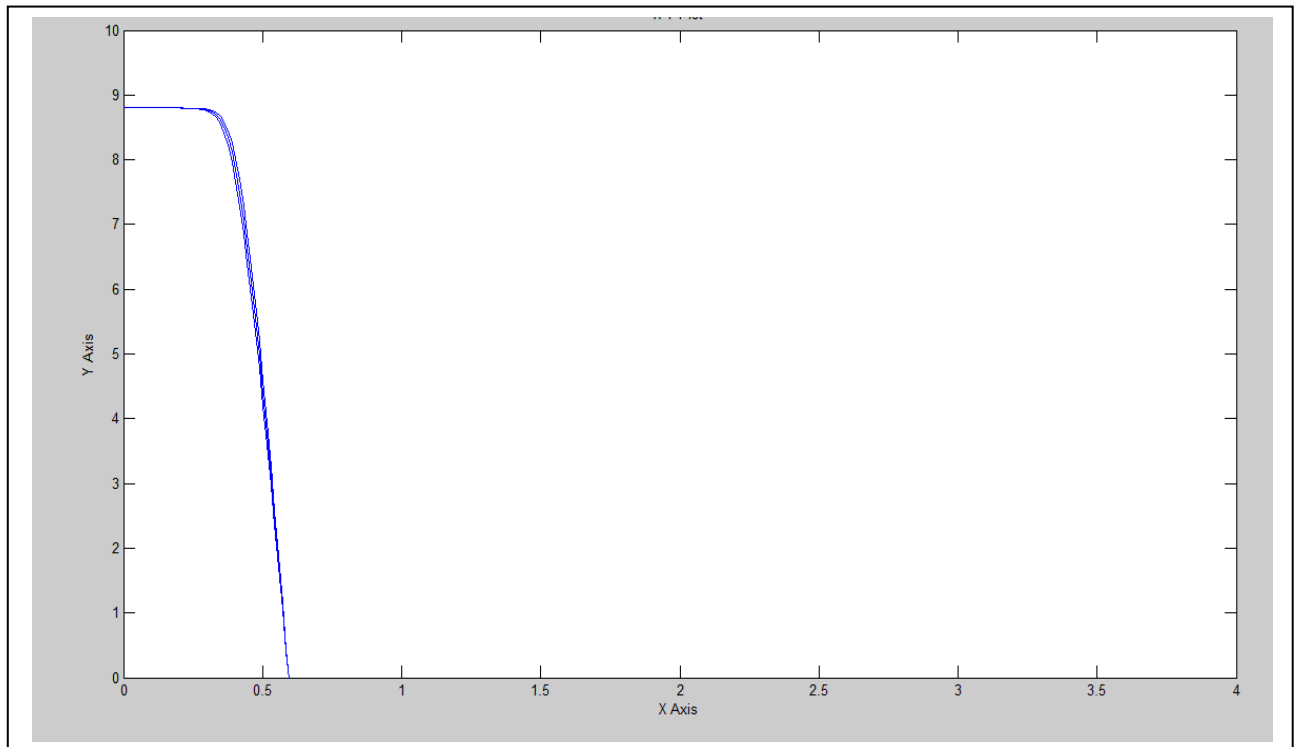


Figure III.17 . Influence de R_s (0.016 0.017 0.018) sur la caractéristique $I=f(V)$ de panneaux solaire de type **YL245p-29b**

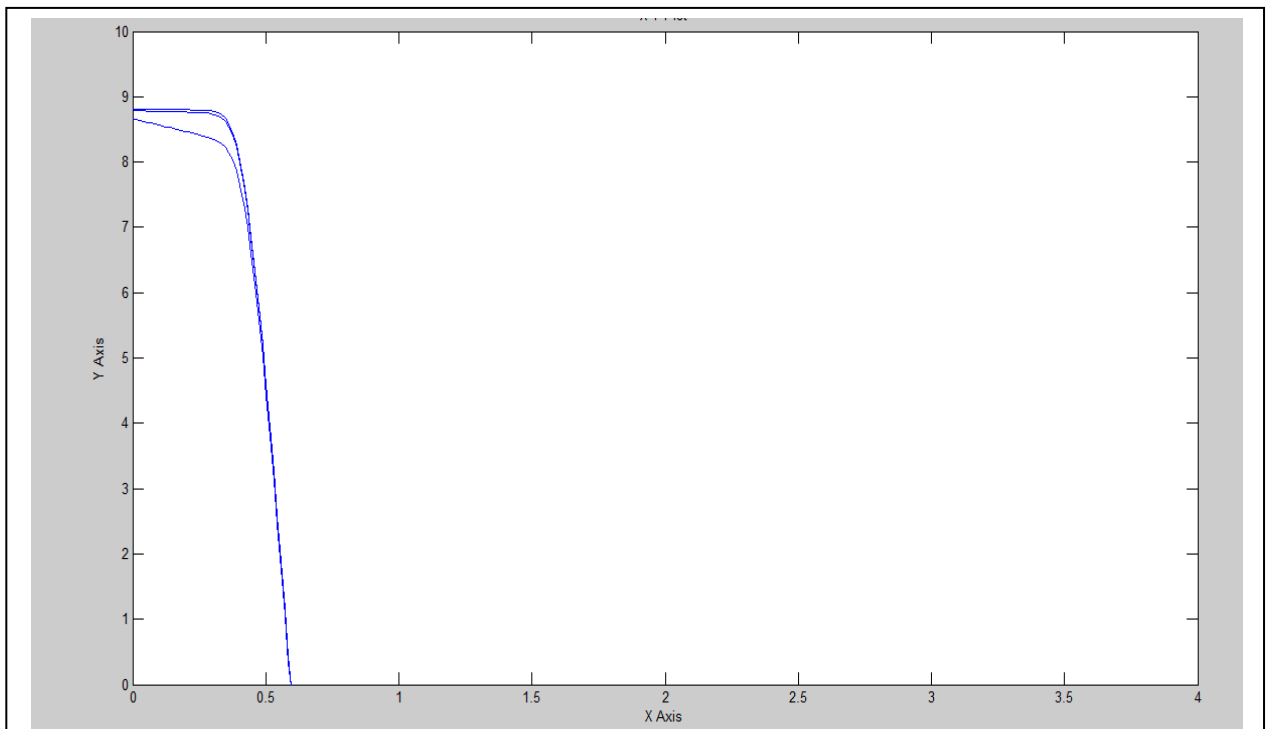


Figure III.18 . Influence de $R_p(1666 10 1)$ sur la caractéristique $I=f(V)$ de panneaux solaire de type YL245p-29b

III.5.Simulation d'un système Photovoltaïque

La Figure III .13 donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés: GPV, DC-DC et MPPT.

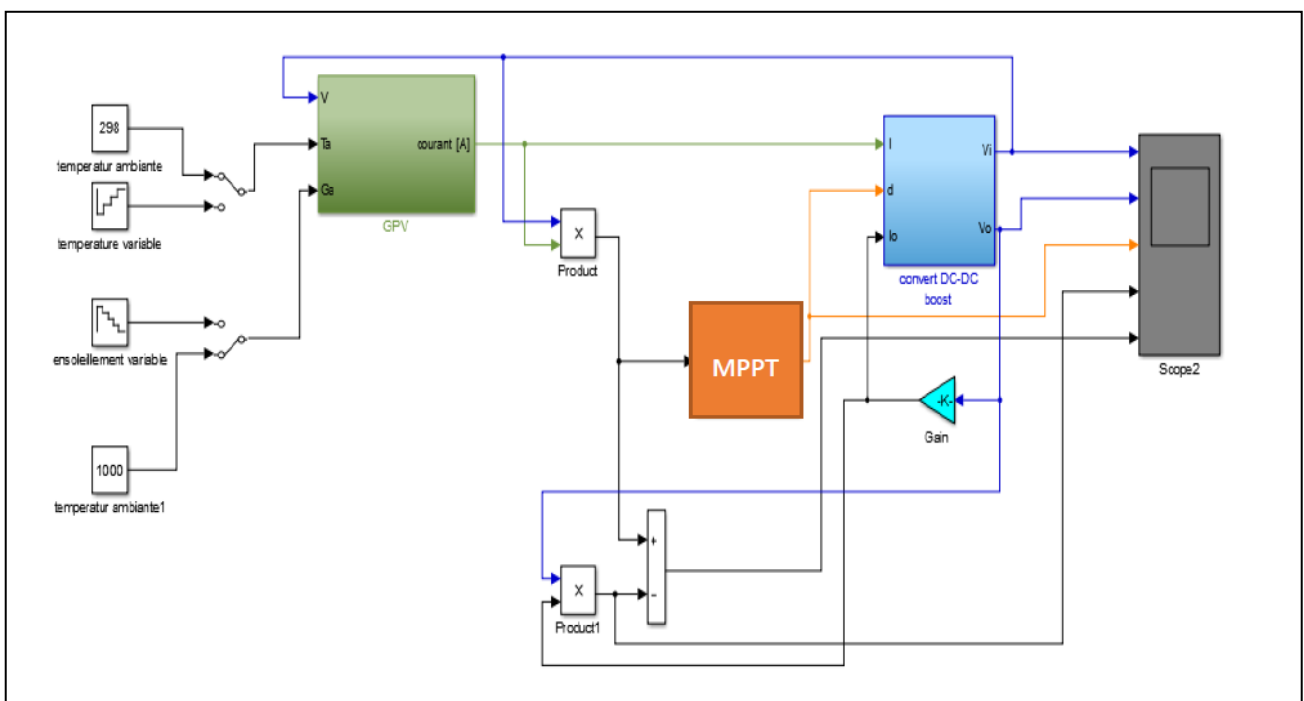


Figure III.19.schéma block de système photovoltaïque

III.5.1.Simulation d'un GPV

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre II.

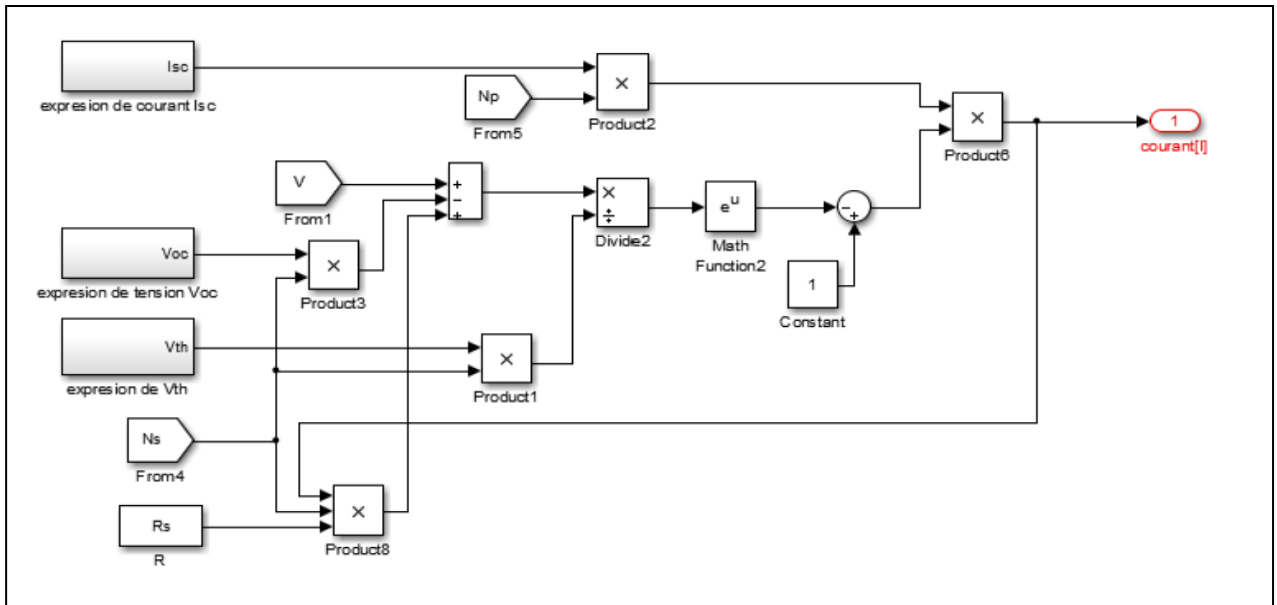


Figure III.20.schéma représente la simulation de GPV

III.5.2.Simulation de convertisseur boost:

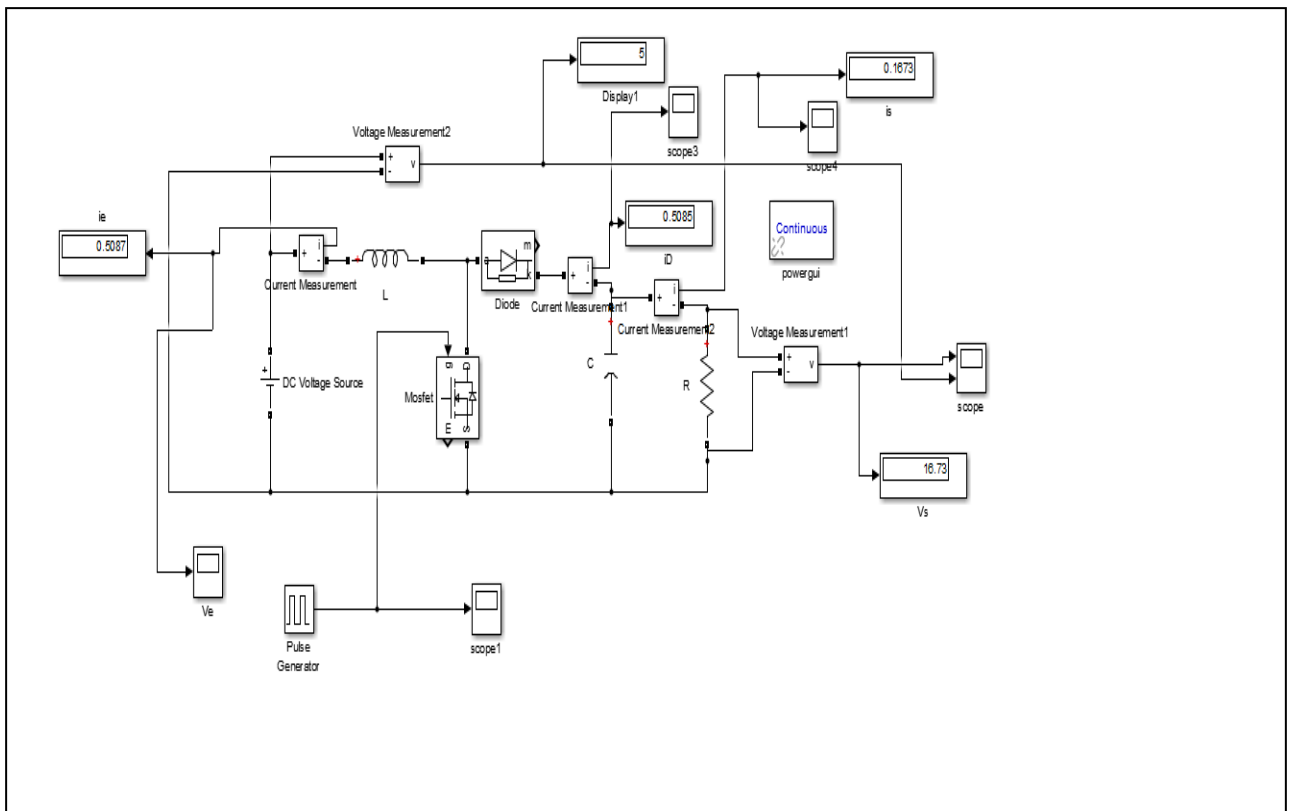


Figure III.21.Représenté le bloc de convertisseur boost

Résultats de simulation de convertisseur boost

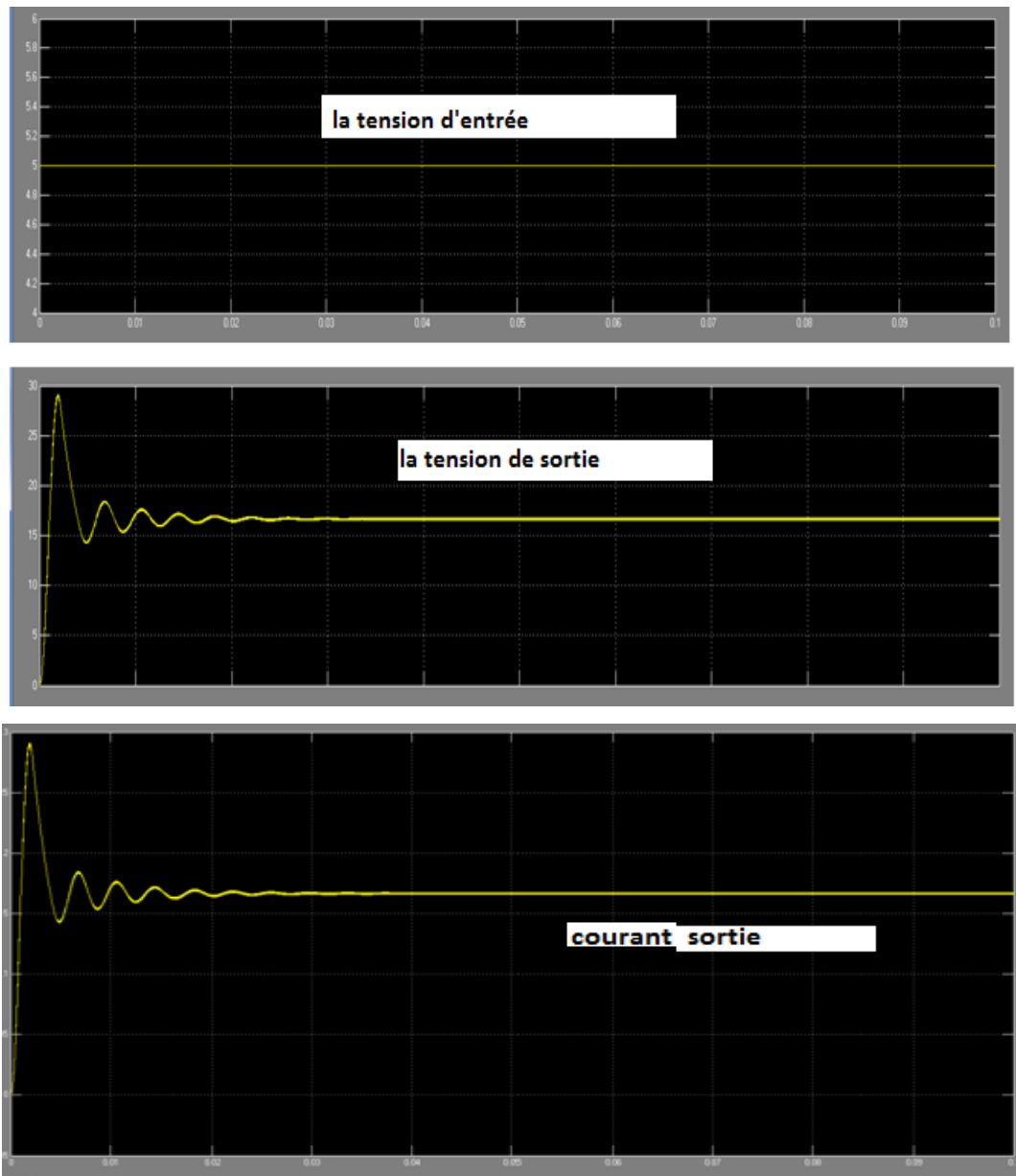


Figure III.22. représenté les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par le figures (III.16) . Cette figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie($V_s=16.7V$) d'hacheur survolteur est supérieur à celle d'entrée($V_e=5V$). Donc l'hacheur survolteur effectuée correctement son rôle.

III.5.3.Simulation de la commande MPPT numérique « P&O »

Cette partie a pour objectif de simuler les différentes boucles de régulation du hacheur.

L'objectif final est de charger la batterie avec un courant maximal en utilisant le panneau solaire au maximum de sa puissance.

III.6. Résultats et discussions [34]

Dans cette simulation on base sur la méthode de P&Ode commande MPPT

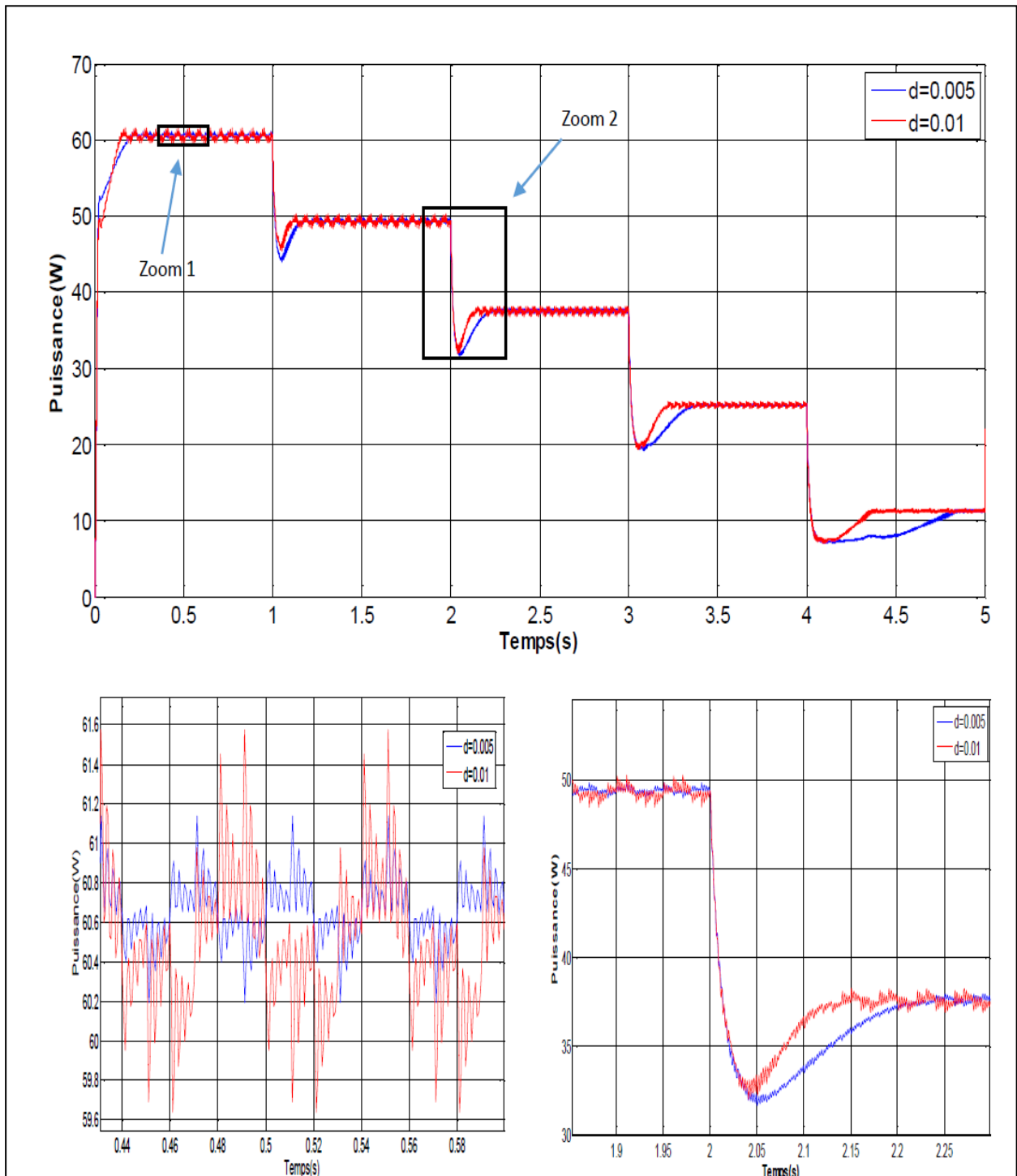


Figure III.23 . Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement d'irradiation: a) Zoom 1, b) Zoom 2

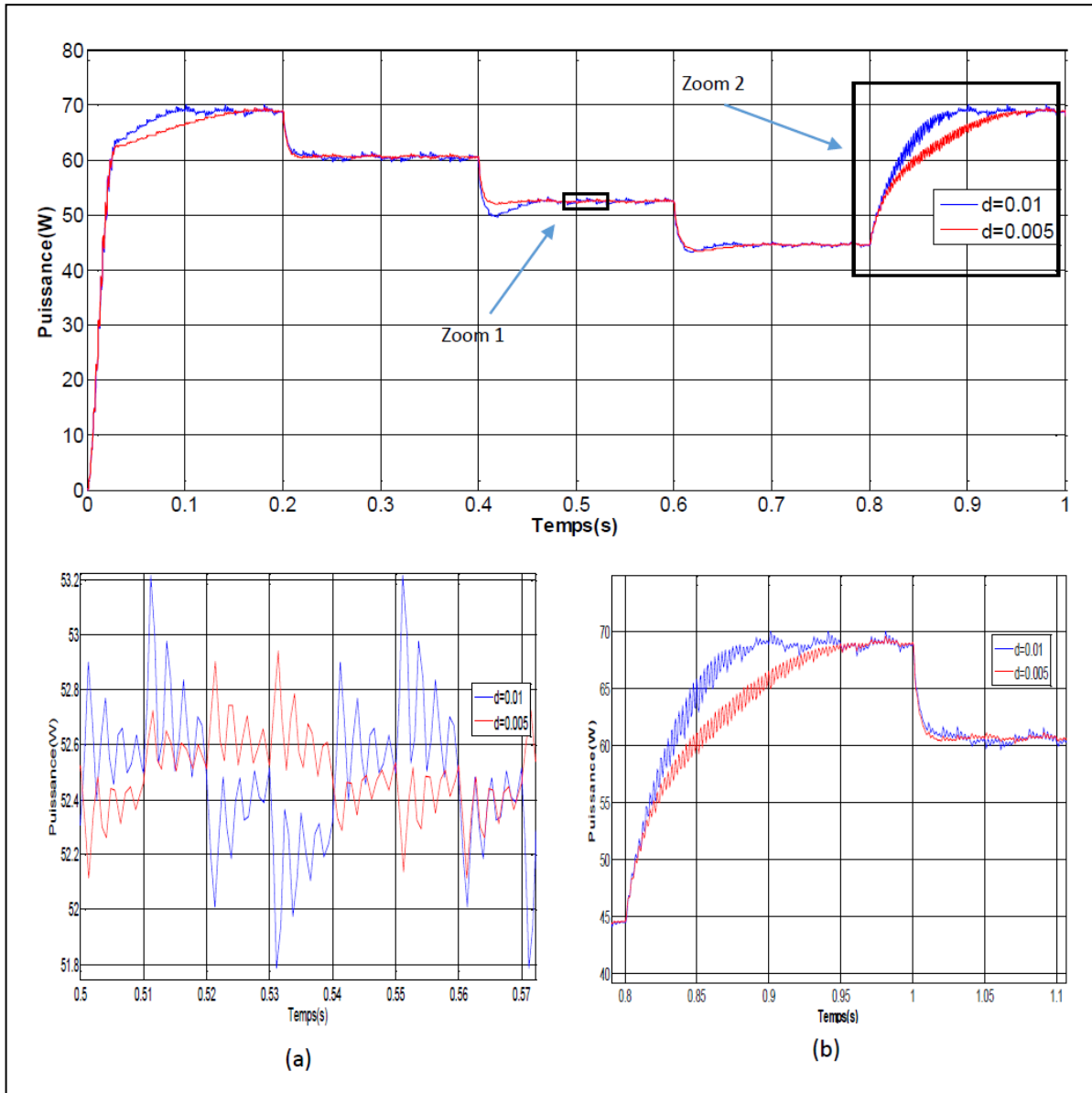


Figure III.24. Variation de la puissance de sortie pour $d=0.005$ et $d=0.01$ dans le cas de changement de température: a) Zoom 1, b) Zoom 2

Les résultats des Figures III.23 et III.24 montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale, nous remarquons que si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Par contre, si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

III.7.Simulation de conversion éolienne

Pour faire la simulation de conversion éolienne ,il faut entrée les donnes expérimental .cette méthode est basée sur les blocs suivant:

Etape 1 bloc de simulation du vent

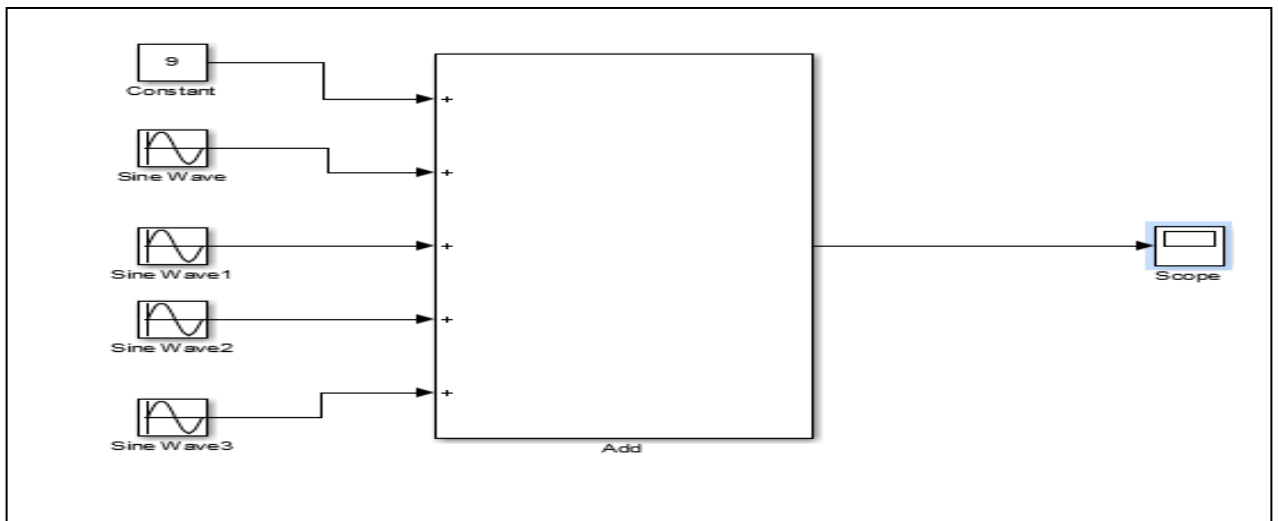


Figure III.25. Bloc de simulation de la vitesse du vent

III.7.1. Résultat de la simulation du vent

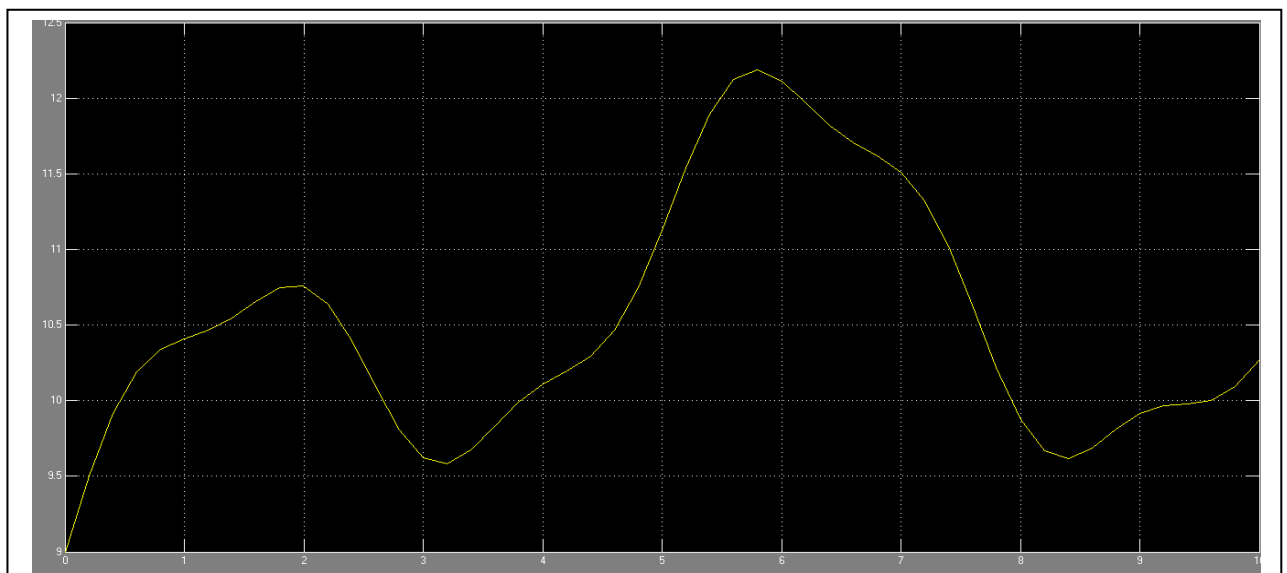
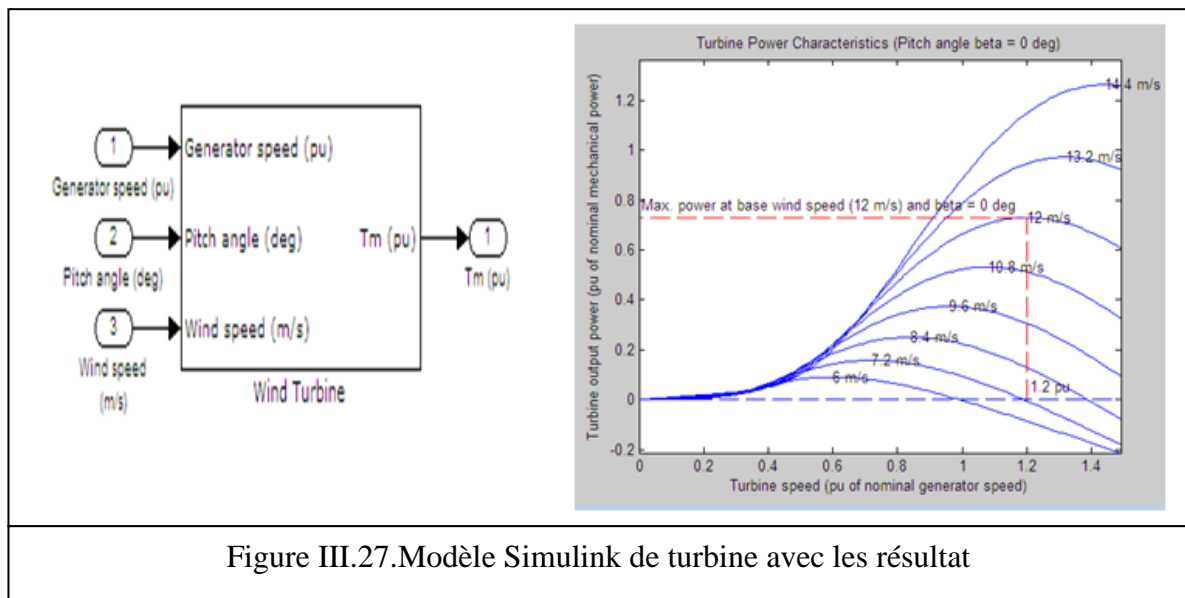


Figure III.26. évolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s)

La figure (III.12) montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (10S) entre deux valeur $V_v=12\text{m/s}$ comme un valeur maximale et $V_v=9,6\text{m/s}$ comme un valeur minimale

III.8.Simulation de la turbine éolienne

Modèle Simulink de turbine



Conclusion

Dans ce chapitre on fait la simulation d'un panneau photovoltaïque. Nous avons utilisé l'environnement Matlab /Simulink pour tracer la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire. Ces études sont effectuées sur une cellule d'un panneau solaire de type **YL245p-29b**. et on étudie l'influence de ($T-G - R_s$ et R_{sh}) et la simulation de convertisseur boost et la commande MPPT, dans une autre partie d'énergie éolienne on fait la simulation de vitesse de vent et la turbine éolienne.

Chapitre 04

Etude théorique d'un système hybride

IV .INTRODUCTION

Pour un développement durable le recours à l'utilisation des systèmes énergétique à sources d'énergie renouvelables est devenu indispensable .les solutions technologiques nouvelles propose par les systèmes énergétique hybride .même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono sources ,présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif.ces installations hybrides vont connaitre, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire. Dans cette étude en va exprimé un bref rappel sur les systèmes hybrides [36].

IV.1.Définition de système hybride

Un système hybride à sources d'énergies renouvelables est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage.

La combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelable permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien de point de vue technique qu'économique.

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

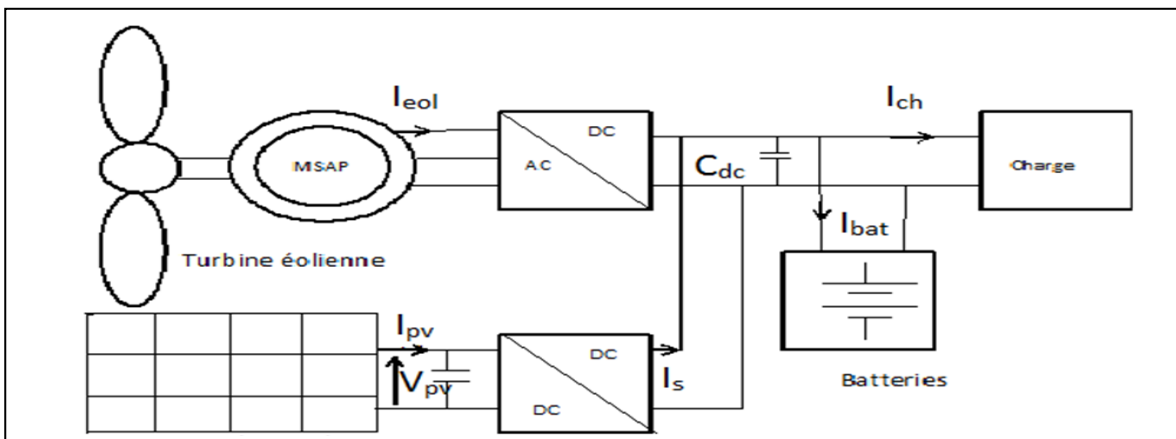


Figure IV.1.schéma représente un système hybride

IV.2.La configuration des systèmes hybride

Les générateurs électriques d'un Système Hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou

mixte. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitués de sources d'énergie renouvelable, avec ou sans stockage

IV.3. Les différentes combinaisons de système hybride

Il existe plusieurs combinaisons :

- Photovoltaïque-groupe électrogène
- Eolien-diesel
- Eolienne-photovoltaïque-diesel
- photovoltaïque-éolien, stockage à batteries,
- photovoltaïque -éolien, stockage à hydrogène,

Bien que le groupe électrogène et le moteur diesel ne sont pas des sources d'énergie renouvelable en soit, ils sont utilisés généralement dans les systèmes hybride comme alimentation de se cours.

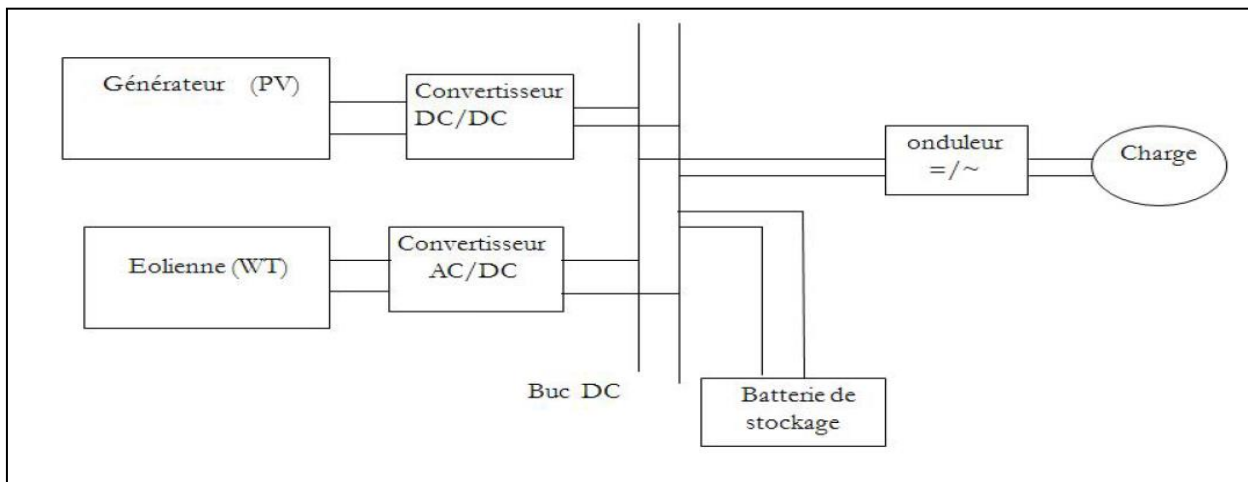


Figure IV.2. système hybride (photovoltaïque –éolienne)

IV.4. Avantages et inconvénients d'un système hybride

A). Avantage

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Capable de satisfaire des charges évolutive • Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.
- Faible couts liés au cycle de vie de l'électricité pour des application

B). Inconvénients

- Coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.

- Plus complexe que les systèmes électrique isolés ; nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité.

Conclusion générale

En conclusion, un mémoire est un document officiel, il doit être écrit de manière structurée, organisée et surtout doit comporter des sections logiquement chaînées afin de mettre en valeur le travail de recherche. Malgré les conditions que traverse le monde, représentées par l'épidémie du virus mortel Corona, nous nous sommes efforcés de terminer notre mémoire, mais nous n'avons pas pu atteindre l'objectif principal de simuler l'ensemble du système d'énergie solaire, mais nous avons simulé une cellule solaire et un système de cellules solaires isolé. Quant à l'énergie éolienne en raison de la pénurie de du temps et du fait que les travaux demandent beaucoup de temps, nous avons simulé la vitesse des éoliennes et des éoliennes sur lesquelles nous nous sommes appuyés uniquement sur le côté théorique, les résultats qui ont pu être obtenus sont les suivants avec explication de travail que nous avons accomplis. Dans notre mémoire l'étude est basée sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) et d'un système éolienne. Au premier lieu nous avons vu des notions sur les énergies solaire et éolienne, le principe de fonctionnement, nous avons abordé aussi les différents groupements possibles des cellules et défini son rendement et le Facteur de forme. Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB/Simulink pour tracer les caractéristiques (I-V) et (P-V), puis un générateur photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristique d'une cellule PV, ainsi l'influence de résistance série et shunt. Finalement, nous avons présenté le fonctionnement du hacheur DC-DC (boost) et la commande MPPT, et faire la simulation du hacheur boost qui fait notre rôle c-a-d en résultat nous vus le tension de sortie très élevée par rapport le tension d'entrée.

Les références:

- [1]: ...nne.e-monsite.com
- [2]: www.edfenr.com
- [3]: MAD7231.pdf
- [4]: <http://oooxylene.alwaysdata.net/eolienne.html>
- [5]: Gestion d'énergie dans un système hybride éolienn –photovoltaïque .pdf
- [6]:projet éolienne.pdf
- [7]: Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980
- [8]:centrale éolienne. pdf
- [9]: **O. 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 de l'école Normale supérieur de CACHAN, 2002
- [10]:<http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [11] : **BOUALEM DENDIB**, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative".Université Ferhat Abbas-Sétif ,mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [12]: **M. Dahbi**,« Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [13]:**Touil.N,Ghenbazi.S**, "Modélisation et Simulation d'un systèmephotovoltaïque",MasterAcademique ,université Echahid Hama Lakhder d'EL-Oued Septembre 2015..
- [14]:Googl image
- [15]:M.T-121-01.pdf
- [16]:**Céline Bernard,CarolinaSebrao** –Olivera,Bernard Laval, Clément vaudouer "panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue Automne",2009, pages: 2-3-4.

- [17]: **HANANOU .FATIHA , ROUABAH . AICHA**, "Modélisation et Simulation d'une systéme photovoltaïque", Mémoire Master Academique ,09/06/2014
- [18]: **M. messoude**, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage «mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.
- [19]: R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [20]: **T. Fogelman**, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982.
- [21]: **B. Fléche, D. delagnes**, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.[22]:Modélisation et Simulation d'un module photovoltaïque.pdf
- [23]: **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.
- [24]: **BENSACI Wafa** ." Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT".Mémoire Master ." Université KasdiMerbah–Ouargla".2011.
- [25]: **HANANOU .FATIHA , ROUABAH . AICHA**, "Modélisation et Simulation d'une systéme photovoltaïque", Mémoire Master Academique ,09/06/2014
- [26]: **C. C. Hua and C. M. Shen**, "Study of maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system," Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, 1998, pp. 8
- [27]: **Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-JieSu, Member, IAENG** "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA
- [28]: **S. Lalouni , D. Rekioua , T. Rekioua , E. Matagne**, «Fuzzy logic control of stand-alone Photovoltaic system with battery storage», Journal of Power Source, vol. 193, N°: 2, pp: 899–907, 2009
- [29]: **Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen**, « Implementation of a DSP-controlled PV system with peak power tracking », IEEE Trans. Industrial Electronics, vol: 45, N°: 1, pp: 99–107, 1998.
- [30]: **I. Vechiu**,« Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.
- [31]: **BurriAnkaiah, JalakanuruNageswararao**, "Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current Mppt Method»,

IJESI, Volume 2 Issue 2, PP.45-50, February 2013.

[32]: **Cédric CABAL**, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Doctoral thesis, University of Toulouse, LAAS, December 2008.

[33]: **Antonio luque and Steven Hegedus**: Handbook of photovoltaic science and engineering_Wiley December 2002.

[34]: **BENADEL Faiza**, " Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV", MEMOIRE DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2015-2016.

[35]:

[36]: Etude et simulation d'un système hybride (éolienne-solaire)

