

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

***Étude d'un système d'énergie
renouvelable avec système de
stockage***

***Dirigé par :**
Mr. LABBI Yassine

***Co-encadreur :**
Mr. MENACEUR Redha

***Réalise par :**
BEDIDA Tarek
BEN AMAR Radhia

Soutenu 23-24 Juin 2014

Résumé

L'électricité photovoltaïque est perçue comme une importante source d'énergie renouvelable. Le champ photovoltaïque est une source de puissance instable, dont le point de puissance crête dépend de la température et de l'irradiation. Un suiveur du point de puissance maximale est alors nécessaire pour une efficacité optimale.

A cet effet, dans le présent travail l'optimisation le fonctionnement par l'utilisation de méthode de contrôle (MPPT) est proposée pour détecter le point de puissance maximale pour un panneau photovoltaïque, ils sont utilisés pour générer la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. Un système photovoltaïque est composé d'un module solaire avec régulateur solaire MPPT il est modélisé et simulé. Les résultats de simulation montrent que l'efficacité de cette technique (P&O) est de tirer le maximum d'énergie avec un temps de réponse rapide lors des variations dans les conditions de travail.

Mots clés : Système photovoltaïque, PV, Optimisation, MPPT, Perturbation et Observation (P&O).

Abstract

Photovoltaic electricity is seen as an important source of renewable energy. The photovoltaic array is an unstable source of power since the peak power point depends on the temperature and the irradiation level. A maximum peak power point tracking is then necessary for maximum efficiency.

In this work, a method of control (MPPT) to optimize the operation is proposed to detect the point of maximum power for a photovoltaic panel, are used to generate the optimal MPP, such that solar panel maximum power is generated under different operating conditions. A photovoltaic system including a solar panel with MPPT technique is modeled and simulated. The simulation results show the effectiveness of this technique (P&O) is to get the maximum energy with a fast response time when changes in working conditions.

Key words: Photovoltaic, PV, Optimization, MPPT, Perturb and Observe (P&O).

الملخص

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرا هاما من مصادر الطاقة المتجددة. تمثل الألواح الكهروضوئية مصدرا لطاقة غير مستقرة (متذبذبة) حيث نجد أن نقطة الاستطاعة القصوى تتعلق بدرجة الحرارة ومستوى الإشعاع الضوئي. لذلك فإنه من الضروري تتبع نقطة الاستطاعة من أجل تحقيق أقصى فعالية.

في هذا العمل لأجل تحسين ومثالية التشغيل اقترحنا طريقة التحكم (MPPT) لأجل تعقب نقطة الطاقة القصوى للوح الضوئي، لقد أثبتت الدراسات في مختلف التطبيقات مدى فعاليتها في إيجاد الحلول الشاملة بالأخص في الحالات التي يتعذر فيها تحليل المشكل خطيا.

لبيان مدى فعالية هذه المنهجية قمنا بتطبيق هذا البرنامج لتعقب نقطة الاستطاعة العظمى والتي يتم استعمالها لاستغلال أحسن للطاقة الناتجة من اللوح الكهروضوئي وتحت شروط متغيرة تتمثل في كل من (درجة الحرارة والإشعاع الضوئي)، في دراستنا نقوم بعمل نموذج يتكون من لوح كهر وضوئي مع نظام تحكم مبني على تقنية تعقب نقطة الطاقة القصوى لإجراء تجارب ومعرفة مدى فعالية هذه التقنية، حيث نجد أن النتائج المحصل عليها تبين فعالية هذه التقنية (P&O) لإيجاد الحل الأمثل (استطاعة قصوى) تحت مختلف الشروط المذكورة أعلاه بأسرع وقت ممكن.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، لوح ضوئي (PV)، تعقب نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، الاضطراب والمراقبة (P&O).



Remerciements

Je remercie chaleureusement Monsieur Labbi Yacine de m'avoir encadré et encouragé tout au long de ces travaux. Par leurs grandes compétences scientifiques et leurs remarquables qualités humaines, ils ont su rendre chaleureuses et fructueuses à la période.

Je voudrais témoigner ma profonde reconnaissance à monsieur Menaceur Redha pour son aide et son soutien moral.

Je tiens à remercier monsieurs Barka Nourddine, Basousenourddine et Baguzi Khaled.

Il serait dommage, dans ces remerciements, d'oublier mes proches et mon professeur madame Nawal de souf school l'ensemble des amis qui m'ont soutenu au l'université de ELQOUED.

-TARAK

-REDHA

Dédicace

Dieux merci et les meilleures salutations sur notre prophète Mohammed et après ce travail à celle qui ma donnée toute sa a vie en m 'éduquant et le paradis est sous ses pied à ma chère maman sakina .

A celui qui a tant travailler pour moi mon plus cher père Abd elaziz

A mon chère frères Abdel hafid , Mohammed elhabibe et Laghari

A tous ce qui mon partager mon bonheur mes chères sœur Nawal, Latifa, et Nadia

A mon encadreur monsieur Labbi yacine

Qui m 'a tant donné des conseille afin d 'avoir ce bon travail

A mon professeurs monsieurs Menaceur Redha , Bassouse Nour edine, et Bagouzi Khaled et ma très cher professeurs madame Nnawel de souf school

Pour les enfants Nihal, Manal, Mohamed Bashir, Mohamed Mahdi, Sondos et Adlan

Et a tous mes proches et mes amis

RADHA

Dédicace

A ma chère mère Fatima, et mon cher père Abdelkader, pour tout le mal qu'ils se sont donnés afin de me faciliter ma tâche, en témoignage de la profonde affection que je leur porte.

A mes frères Massoud, Saïd et sa femme rebek

A mes soeurs : Sabahe, Assma, Bissmala, Noor Houda, Ikhelasse et Aïa qui n'ont beaucoup soutenu durant toutes mes études.

A ma fiancée Intissar

A mon très cher professeur madame nawel de souf school

Pour les enfants Mohammed et Isra

A tout les oncles

A tout la famille ; BEDIDA

A mon camarade de travail : radhia

A mes camarade de classe : Mohamed, Mohamed Djemoui, Amara, Mohamed Seghir, Abd Eeazzak, Zineddine, Mohamed Elhadi

A tout mes amis : Foudhil, Kamel, Yacine, Najib, Hassen, Ali, Ridha, Nacer, Hamada, Badis, Ahmed, Laater.....

A tout mes professeurs ; qu'ils sont guidé dans mes étude

A tout la promotion d'Electronique 2013/2014

TAREK

Sommaire

- Résumé
- Remerciements
- Dédicace
- Sommaire.....I
- Liste de figure.....V
- Liste de tableau..... IX

Introduction générale.....1

Chapitre I ***Énergie Renouvelable***

I.1 Introduction:4

I.2 La production de l'électricité:4

I.2.1 Le principe de production :4

I.2.2 Les différents types d'énergie:5

I.2.2.1 Énergies non renouvelables :5

I.2.2.2 Énergies renouvelables:6

I.3 Électricité photovoltaïque:10

I.3.1 Historique :10

I.3.2 Le soleil et le rayonnement:11

I.3.2.1 Le soleil:11

I.3.2.2 Le rayonnement:12

I.3.2.3 Modèle simplifié de l'éclairement:12

I.4 Conclusion :14

Chapitre II

La cellule photovoltaïque et les caractéristiques de générateur

II.1	Introduction:	15
II.2	Les Cellules Solaires :	15
II.2.1	Fabrication des cellules solaires :	15
II.2.2	Principe d'une cellule photovoltaïque	16
II.2.3	Les types des cellules solaires :	17
II.3	Les modules (ou panneaux):	18
II.4	Les différentes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque :	19
II.4.1	Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire:	19
II.4.2	la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque:	22
II.5	Générateur photovoltaïque :	24
II.6	Caractéristiques tension-courant et puissance-tension sous différentes conditions climatiques :	25
II.6.1	Influence de l'éclairement :	25
II.6.2	Influence de la température :	26
II.6.3	Influence du facteur d'idéalité :	28
II.7	Classification d'un system photovoltaïque :	29
II.7.1	Système photovoltaïque autonomes :	29
II.7.2	Système photovoltaïque raccordé à un réseau :	29
II.8	Avantages et inconvénients d'une installation PV	30
II.8.1	Avantages : [18]	30
II.8.2	Inconvénients : [18]	30
II.9	Conclusion :	31

Chapitre III

La méthode de la poursuite du point de puissance maximale(MPPT)

III.1Introduction :	32
III.2La Connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance :	32
III.3La Connexion GPV-charge via un étage d'adaptation :	34
III.4 Principe de la rechercher du point de puissance maximale :	35
III.5critères d'évaluation d'une commande MPPT :	37
III.6Rendement de la chaine de puissance :	38
III.7La commande MPPT perturbation puis observation :	39
III.7.1Principe des commandes "perturbation et observation" (P&O) :	39
III.7.2Structure de l'algorithme P&O :	40
III.8 Application (MPPT) : Simulations en temps réel :	43
III.9Conclusion :	45

Chapitre IV

Modélisation et simulation du système

IV.1 Introduction :	53
IV.2L'outil Matlab/Simulink :	53
IV.3Système photovoltaïque proposée :	54
IV.4Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :	55
IV.4.1Modelisation du GPV:	55
IV.4.2Simulation du générateur PV :	59
IV.5Modélisation et simulation du hacheur survolteur :	60
IV.5.1Modélisation de hacheur survolteur :	60
IV.5.2Simulation de hacheur survolteur :	62

IV.6 Structure et simulation de la commande MPPT «P&O» :	64
IV.6.1 structure de la commande «perturbation et observation» :	64
IV.6.2 l'algorithme de la méthode MPPT:	66
IV.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT) :	67
IV.7.1 1 ^{er} teste de Simulation: (sans MPPT) :	68
IV.7.2 2 ^{ème} teste de Simulation: (avec MPPT) :	71
IV.8 Conclusion:	75
Conclusion générale.....	76
Références bibliographiques.....	77

Liste de figure

Chapitre I Énergie Renouvelable

Figure I.1: Consommation d'énergie	5
Figure I.2: Eolienne.....	7
Figure I.3: Moulin à vent.....	7
Figure I.4: Moulins à eau	8
Figure I.5: Un barrag.....	8
Figure I.6 : Matière organique (bois).....	9
Figure 1.7: Champ d'essais géothermiques	10
Figure I.8: Les deux types d'énergie solaire.....	11
Figure I.9 : Modèle simplifié de l'éclair	15

Chapitre II La cellule photovoltaïque et les caractéristiques de générateur

Figure II.1 : Cellules solaires	15
Figure II.2 : Différentes étapes de la production d'un système PV.....	16
Figure II.3 : Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction PN).	17
Figure. II.4 : Le module photovoltaïque.....	18
Figure II.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.....	19
Figure II.6 : Caractéristique tension-courant d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure II.7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique $I - V$	25
Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique $P - V$	25
Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur V_{co} , I_{sc} et P_{op}	26

Figure II.10 : <i>Influence de la température sur la caractéristique électrique I-V</i>	26
Figure II.11 : <i>Influence de la température sur la caractéristique électrique P-V</i>	27
Figure II.12: <i>Influence de la température sur I_{sc}, V_{co}, P_{op}</i>	27
Figure II.13 : <i>Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairagements et températures</i>	28
Figure II.14 : <i>Influence de facteur d'idéalité</i>	28
Figure II.15 : <i>Installation photovoltaïque autonome</i>	29
Figure II.16 : <i>Installation photovoltaïques couplée au réseau</i>	30

Chapitre III

La méthode de la poursuite du point de puissance maximale(MPPT)

Figure III.1 <i>Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour</i>	33
Figure III.2 <i>Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion direct GPV-Charge</i>	33
Figure III.3 <i>Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation</i>	34
Figure III.4 : <i>Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque</i>	35
Figure III.5 <i>Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale</i>	37
Figure III.6 <i>Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire</i>	40
Figure III.7 <i>Algorithme de la méthode P&O</i>	41
Figure III.8 <i>Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation</i>	42
Figure III.9: <i>Les conditions climatiques d'un jour à partir de saison hiver (janvier)</i>	44
Figure III.10: <i>Les grandeurs électriques (P, V, I) optimaux d'un jour à partir de saison hiver (janvier)</i>	44
Figure III.11: <i>Les conditions climatiques d'un jour à partir de saison Printemps (Mars)</i> ...	46
Figure III.12: <i>Les grandeurs électriques (P, V, I) optimaux d'un jour à partir de saison Printemps (Mars)</i>	46

Figure III.13: Données d'ensoleillement et température d'un jour à partir de saison Eté (Juillet).....	48
Figure III.14: Les grandeurs électriques (P , V , I) optimaux d'un jour à partir de saison Eté (Juillet).....	48
Figure III.15: Les conditions climatiques d'une journée automnale (Octobre).....	50
Figure III.16: Les grandeurs électriques (P , V , I) d'une journée automnale (Octobre)	50

Chapitre IV

Modélisation et simulation du système

Figure IV.1 : Bibliothèque simulink	54
Figure IV.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)	55
Figure IV.3: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	56
Figure IV.4 : Le modèle Simulink d'une simple cellule PV.....	56
Figure IV.5 : Les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques	57
Figure IV.6 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque	57
Figure IV.7 : Caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques PV (Insolation = 200, 400, 600, 800, 1000 W/m^2).....	58
Figure IV.8 : Caractérisation $I-V$ et $P-V$ des générateur photovoltaïques PV en fonction l'ensoleillement.	58
Figure IV.9 : Photovoltaïque composé de 6 générateurs photovoltaïques connectés en série en MATLAB-SIMULINK.....	59
Figure IV.10 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension.....	60
Figure IV.11 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)	60
Figure IV.12: Schéma block d'un convertisseur survolteur	62
Figure IV.13 : Signal commande DC/DC (gâchette d'hacheur).	62
Figure IV.14: Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur.....	63

Figure IV.15 : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la puissance de sortie d'hacheur survolteur.	63
Figure IV.16 : Le rendement de l'hacheur survolteur.	64
Figure IV.17 : Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation » (p&o)	65
Figure IV.18 : Schéma matlab simulink d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).	67
Figure IV.19 : L'ensoleillement en fonction du temps	68
Figure IV.20 : Le courant ($I_{ref} = I_{ph}$), la tension et la puissance photovoltaïques en fonction de temps sans intégrer le contrôleur (MPPT-P&O) et pour Variation d'ensellement	69
Figure IV.21 : Courant de sortie du convertisseur DC-DC (Hacheur) en fonction de temps .	70
Figure IV.22 : Comparaison les puissances P_{out} , P_{pv} à $P_{idéal-pv}$	70
Figure IV.23 : Comparaison l'Energie E_{out} , EPV à $E_{idéal} - PV$ en kilowattheure	70
Figure IV.24 : Le rapport cyclique du hacheur survolteur en fonction de temps	71
Figure IV.25 : Rendement de la convertisseur DC-DC en fonction de temps	71
Figure IV.26 : L'ensoleillement en fonction du temps	71
Figure IV.27 : Le courant ($I_{ref} = I_{ph}$), la tension et la puissance photovoltaïques pour Variation d'ensellement en fonction de temps	72
Figure IV.28 : Courant de sortie du convertisseur DC-DC (Boost)	73
Figure IV.29 : Comparaison les puissances P_{out} , PPV à $P_{idéal} - pv$	73
Figure IV.30 : Comparaison l'Energie E_{out} , EPV à $E_{idéal} - PV$ en kilowattheure	73
Figure IV.31 : Le rapport cyclique ($Duty_{cycle}$) du hacheur survolteur en fonction de temps ..	74
Figure IV.32 : Rendement de la hacheur (boost) en fonction de temps	74

Liste de tableau

Chapitre III La méthode de la poursuite du point de puissance maximal (MPPT)

Tableau III.1: Les données météorologiques pour une journée type de saison hiver (janvier) ..	43
Tableau III.2 : Les caractéristiques électriques en fonction du temps.	45
Tableau III.3 : Les données météorologiques pour une journée type de saison Printemps (Mars).	45
Tableau III. 4: Les caractéristiques électriques en fonction du temps.	47
Tableau III.5: Données météorologiques pour une journée type de saison Eté (Juillet)	47
Tableau III.6: Les caractéristiques électriques en fonction du temps.	49
Tableau III. 7: Données météorologiques pour une journée type de saison Automne (Octobre).....	49
Tableau III.8: Les caractéristiques électriques d'une journée automnale	51

Chapitre IV Modélisation et simulation du système

Tableau IV.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau dans les conditions standards «CST»	59
--	-----------

Introduction générale

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions de réglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production.

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources faciles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Sans énergie, notre monde ne pourrait fonctionner. En effet, l'homme, les machines et la nature en ont tous besoin. La demande totale d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique, à la disponibilité limitée des sources d'énergie et aux coûts sociaux et environnementaux de l'approvisionnement d'énergie. Mais, en principe, nous disposons de suffisamment d'énergie. Le soleil fournit une énergie lumineuse colossale à la Terre (10.000 fois l'énergie nécessaire). Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole...) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, ... entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies

renouvelables utilisables actuellement sont l'énergie hydraulique, le chauffage solaire actif, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie photovoltaïque, la biomasse ...etc.

Dans un contexte de crise énergétique mondial et de réchauffement climatique, il est dès lors aisé de comprendre l'engouement des gouvernements à encourager l'installation de systèmes photovoltaïques.

Les performances à grande échelle citées plus haut sont très attractives, mais avant de les atteindre, il faudra s'affranchir de certaines contraintes en optimisant le fonctionnement global d'un système photovoltaïque. Ainsi, en revenant à une plus petite échelle et en considérant un site de production décentralisée autonome, il faudra notamment s'affranchir du caractère intermittent de la fourniture d'énergie tout en permettant aux panneaux photovoltaïques de fonctionner dans des conditions optimales.

Pour parvenir à cet objectif, il faudra s'affranchir des deux principaux problèmes à la production d'énergie photovoltaïque en site isolé qui sont la difficulté de fonctionnement suivant un point optimal et le stockage efficace de l'énergie produite. En effet, du fait du caractère non linéaire de la caractéristique des panneaux photovoltaïques, leur tension dépend fortement de la charge connectée. Pour corriger ce problème, des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettent aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi d'extraire le maximum de puissance.

Dans cette mémoire partagée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, nous focalisons notre attention sur la production d'électricité.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la cellule photovoltaïque et les caractéristiquement générateur PV et ses performances des contrôles, les systèmes photovoltaïques, les avantages et les inconvénients, le chapitre suivant nous avons étudié la méthode pour l'optimisation de photovoltaïque MPPT.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les études en simulation qui ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

Cette simulation permet de tester le modèle d'une manière suffisante. Pour cela, nous avons choisi les données à travers la région de Bechar, Algérie et les données météorologiques pour une journée.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation qui ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

Chapitre I



Énergie
Renouvelable

Introduction:

L'épuisement proche des ressources énergétiques fossiles ainsi que les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, incitent au développement des énergies renouvelables.

Une source d'énergie est renouvelable, si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire.

Un argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en ce type d'énergies. Au cours du 21^{ème} siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître [1]. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

I.1 La production de l'électricité:

I.1.1 Le principe de production :

Toutes les centrales électriques produisent de l'électricité grâce à des systèmes couplés turbine et alternateur. L'énergie utilisée dans les centrales électriques est destinée à la mise en mouvement des turbines.à la sortie de la centrale.

I.1.2 Les différents types d'énergie:

On distingue les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables :

Les premières sont le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium (avec les technologies actuelles).

Les secondes couvrent l'hydraulique, la biomasse et les déchets, l'éolien, le solaire, le géothermique, les marées et les courants (marins ou des rivières). Toutes ces énergies ne sont pas utilisées de la même façon.

I.1.2.1 Énergies non renouvelables :

Le pétrole ou le gaz naturel ne sont pas des énergies renouvelables car il faudrait des millions d'années pour reformer la quantité d'énergie fossile que l'on consomme actuellement. De même, l'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable car la réserve d'uranium disponible sur Terre est limitée.

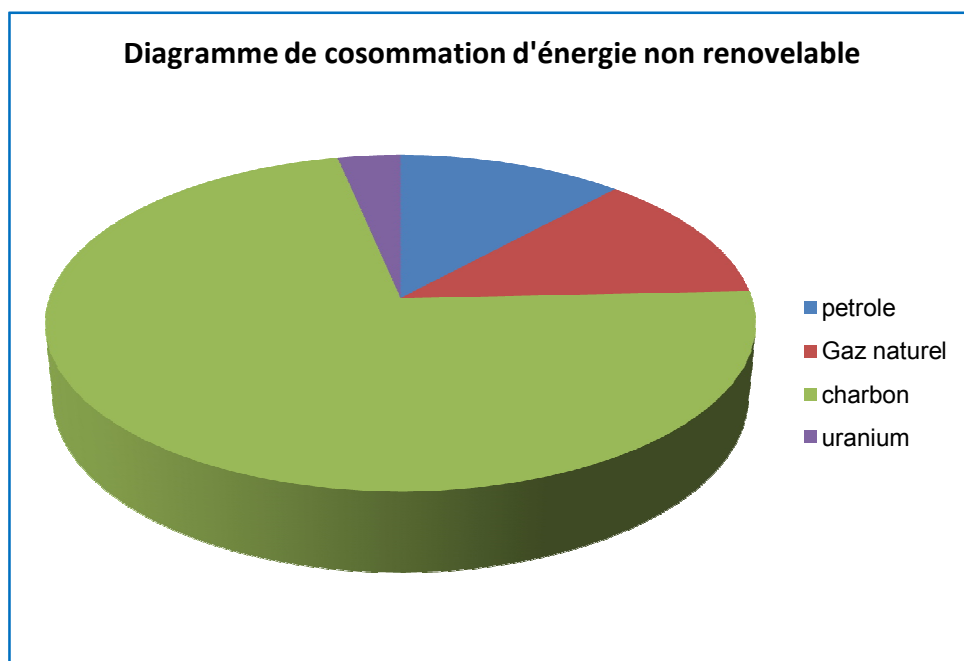


Figure I.1: consommation d'énergie [1]

L'énergie non renouvelable présente certains inconvénients:

L'énergie non renouvelable est une énergie non propre avec déchets, et provoquent la pollution de l'environnement..

I.1.2.2 Énergies renouvelables:

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'humain. Les énergies renouvelables sont de phénomènes naturels réguliers. Principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à la quelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à la quelle elle est consommée. tous les énergies renouvelables ne sont pas nécessairement propres : par exemple, certains fluides frigorigènes utilisés dans les circuits des pompes à chaleur géothermiques sont des gaz qui, en cas de fuite, contribuent à l'effet de serre, et peuvent aussi détruire la couche d'ozone.[2]

a) Énergie Éolienne:

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Elle peut être utilisée de deux manières : de manière directe et indirecte.

- Conservation 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, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin(Figure I.2).
- Transformation en énergie électrique : l'éolienne (Figure I.3) est accouplée à un générateur électrique pour produire un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

**Figure I.2:** *éolienne***Figure I.3:** *moulin à vent***b) Énergie hydraulique:**

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau (Figure I.4), placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages (Figure I.5) et sert principalement à la production d'électricité.

**Figure I.4:** *moulins à eau***Figure I.5:** *un barrag***c) Énergie de la biomasse:**

La biomasse est la 2^{ème} énergie renouvelable dans le monde. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques végétales ou animales.

Le terme de biomasse recouvre un champ très large de matières : bois (Figure I.6), déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles (pailles, lisiers, etc.), fraction fermentescible des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz de décharge ou produits de méthanisation (lisiers, boues d'épuration, décharges, ...).

L'avenir du bois-énergie passe aussi par la réalisation de réseaux de chaleur. Alimentés par des chaudières, ils distribuent de l'eau chaude pour les logements individuels et collectifs, les mairies, les écoles, les piscines, etc...



Figure I.6 : matière organique (bois)

d) Énergie géothermique:

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. La plus grande partie de la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, vent). Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.



Figure 1.7: *Champ d'essais géothermiques*

e) Énergie solaire:

Électricité ou chaleur :

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire thermique qui, quant à elle, produit de la chaleur à partir de rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas de capteur thermique qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe-eau solaire » ou des « capteurs à air chaud ».

Cet aspect de l'énergie solaire ne pas traité dans cet ouvrage. On évitera dans le terme « capteur solaire » car une maintient l'ambiguïté entre les deux techniques [3].

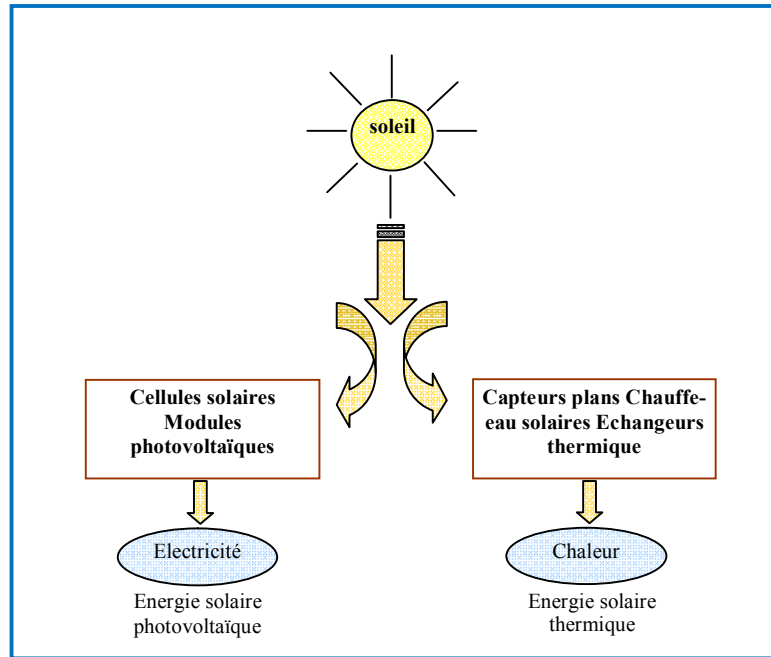


Figure I.8: les deux types d'énergie solaire.

Actuellement beaucoup de travaux ont un intérêt très important pour cette énergie à cause de plusieurs raisons .

Pour ce la ,on va focaliser notre travail sur l'énergie solaire

I.2 Électricité photovoltaïque:

I.2.1 Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839:** le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

- **1875:** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire

- **1954:** trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

- **1958:** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

- **1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

- **1983:** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 400 Km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

I.2.2 Le soleil et le rayonnement:

I.2.2.1 Le soleil:

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie, qui quitte sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre allant de 0,2 μm (ultra-violet) à 4 μm (infra-rouge). Cette énergie représente une source majeure d'énergie dans le futur. Malgré la distance considérable de la terre du soleil (150×10^6 km), la couche terrestre reçoit une quantité de puissance de 180×10^6 GW [4].

I.2.2.2 Le rayonnement:

Le soleil rayonne sur la Terre une énergie de 161015 kWh par an, dans toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière visible. L'énergie lumineuse issue du Soleil est à la base de la majeure partie des formes d'énergie disponibles : énergies chimique, thermique, hydraulique, électrique. Par exemple, les combustibles fossiles, tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ont été formés à la suite d'un stockage d'énergie solaire par des organismes, sur une longue période. En fait, l'énergie nucléaire est la seule à ne pas provenir de l'énergie solaire.

Cette dernière est indispensable pour maintenir sur Terre les conditions lumineuses et thermiques nécessaires à la vie. Par exemple, la photosynthèse utilise cette énergie pour fournir aux plantes chlorophylliennes de la matière organique. Soixante pour cent de l'énergie solaire qui atteint la Terre est réfléchi par l'atmosphère; 11% est réfléchi par le sol et la végétation; 16% entretient, par évaporation, le cycle de l'eau, qui produit la pluie, les eaux de montagne et de rivière [1].

I.2.2.3 Modèle simplifié de l'éclairement:

Une approche simplifiée a été élaborée, et qui servira comme une première approximation pour la quantification de l'éclairement incident. Ce modèle quantifie le flux lumineux pour une journée claire, et qui fait simuler la forme en cloche de l'éclairement à une fonction <<Sinus>> du temps solaire vrai.

Pour notre application, le modèle précité est adopté.

L'expression mathématique d'un tel modèle est la suivante [5] :

$$E = E_M \cdot \sin(h) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$t = t_{sr} + h / 15 \quad (\text{I.2})$$

Où :

E_M : valeur maximale de l'éclairement sur site (obtenue à midi $E_M=1000\text{W/m}^2$).

t_{sr} : temps solaire correspondant au levé du soleil (en heures).

t et h désignent respectivement le temps solaire vrai et l'angle (en degrés), et qui sont définis comme suit :

a) Temps solaire vrai (TSV) :

Le temps solaire vrai à un lieu et à un instant donné est l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et de son mouvement de translation. Par définition, le temps solaire vrai (TSV) est évalué par :

$$TSV = 12 + h/15 \quad (\text{I.3})$$

b) Angle horaire :

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour un lieu donné. Il est lié directement au temps solaire vrai par la relation :

$$h = \frac{360^\circ}{24} (TSV - 12) \quad (\text{I.4})$$

La figure (I.9) montre l'éclairement solaire à partir d'un modèle quantifie le flux lumineux pour une journée claire, et simule la forme en cloche de l'éclairement à une fonction suivant [6]:

$$E = E_M \cdot \sin(15t - 90^\circ) \quad (\text{I.5})$$

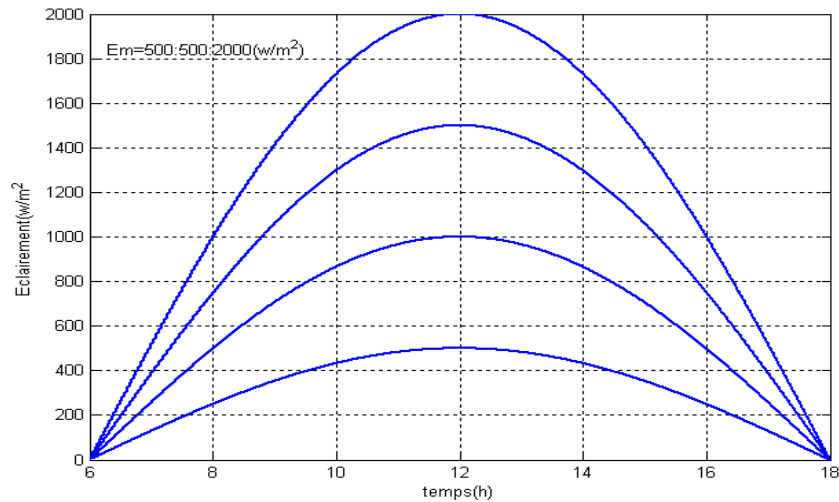


Figure I.9 : *modèle simplifié de l'éclaire*

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre on a représenté les différents types d'énergie (les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables) pour produire l'électricité, puis nous avons traité le principe de l'électricité Photovoltaïque (historique et le rayonnement).

Le prochain chapitre sera donné une étude détaillée sur la cellule PV et les caractéristiques de générateur PV.

Chapitre II



***La cellule
photovoltaïque et les
caractéristiques de
générateur***

I.1 Introduction:

La production d'électricité par conversion de la lumière à l'aide de cellules photovoltaïques connaît un essor fulgurant à l'aube du 21^{ème} siècle avec un taux de croissance record de plus de 40 % en 2000. De nouvelles approches technologiques seront toujours nécessaires afin de réaliser des cellules à faible coût et à haut rendement de conversion énergétique afin de permettre au photovoltaïque de dépasser le seuil de compétitivité par rapport aux autres sources de production d'électricité.

I.2 Les Cellules solaires :

I.2.1 Fabrication des cellules solaires :

Une tranche de silicium réfléchit près de 40% du rayonnement. En réalisant sur la face avant des couches anti-reflets dont la transmission optique est optimisée pour le domaine de longueurs d'onde d'irradiance maximale du spectre solaire, la surface traitée ne réfléchit plus que 4% du rayonnement. Ce sont ces couches anti-reflets qui donnent aux cellules solaires leur couleur bleue alors que le silicium est naturellement gris. Par variation de l'épaisseur de ces couches, on obtient des cellules solaires de différentes couleurs, toujours au prix d'une perte de puissance [7].

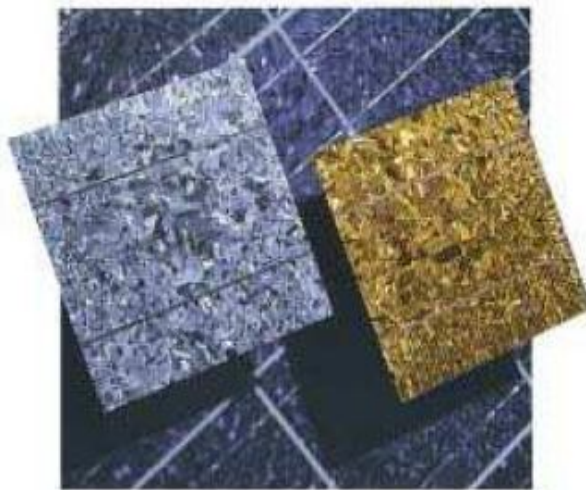


Figure II.1 : Cellules solaires

Le schéma suivant décrit les différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque (technologie cristalline).

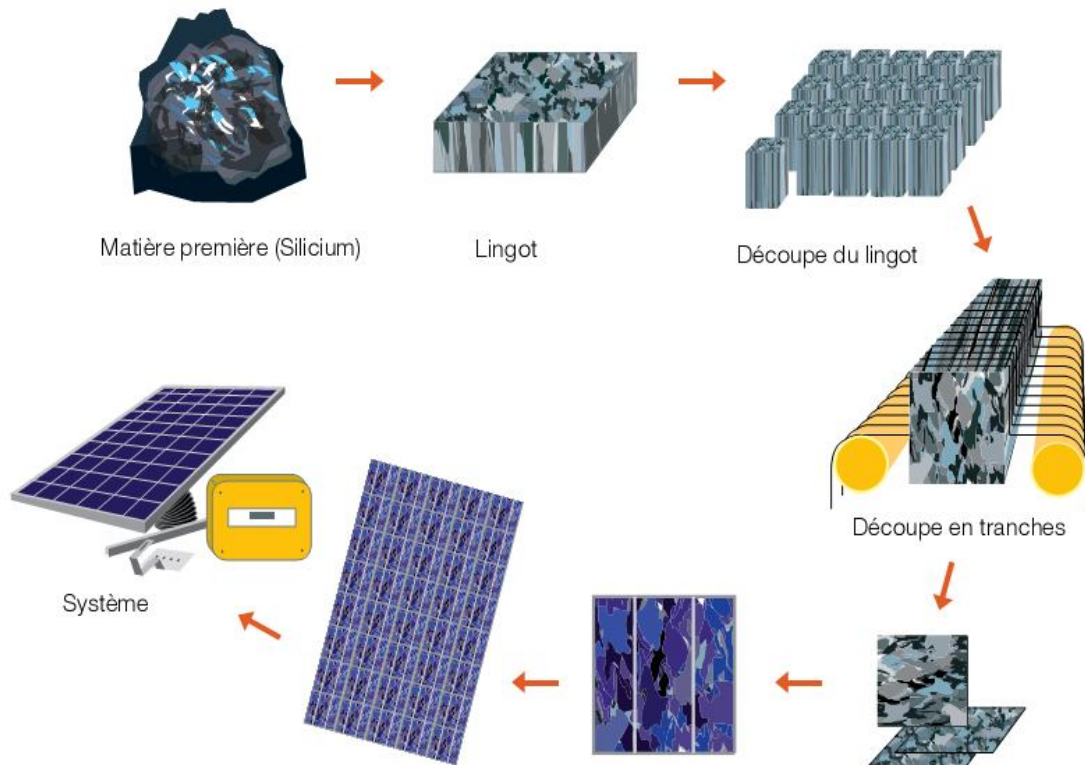


Figure II.2 : Différentes étapes de la production d'un système PV.

I.2.2 Principe d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fem) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La figure II.3 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

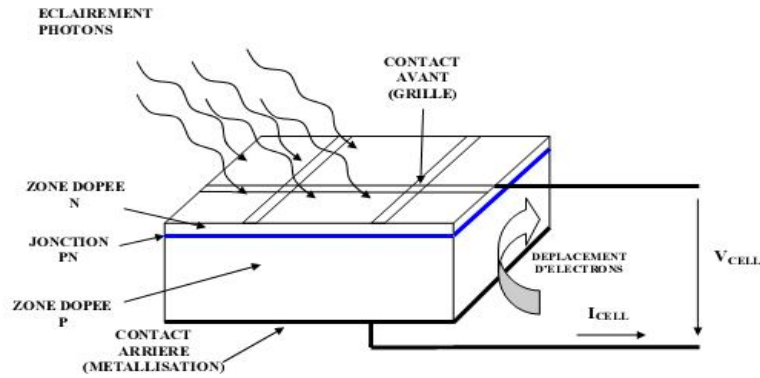


Figure II.3 : Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction PN).

Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule [8].

I.2.3 Les types des cellules solaires : [9]

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

a. Les cellules monocristallines :

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

b. Les cellules polycristallines :

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

c. Les cellules amorphes :

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

I.3 Les modules (ou panneaux):

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt.

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

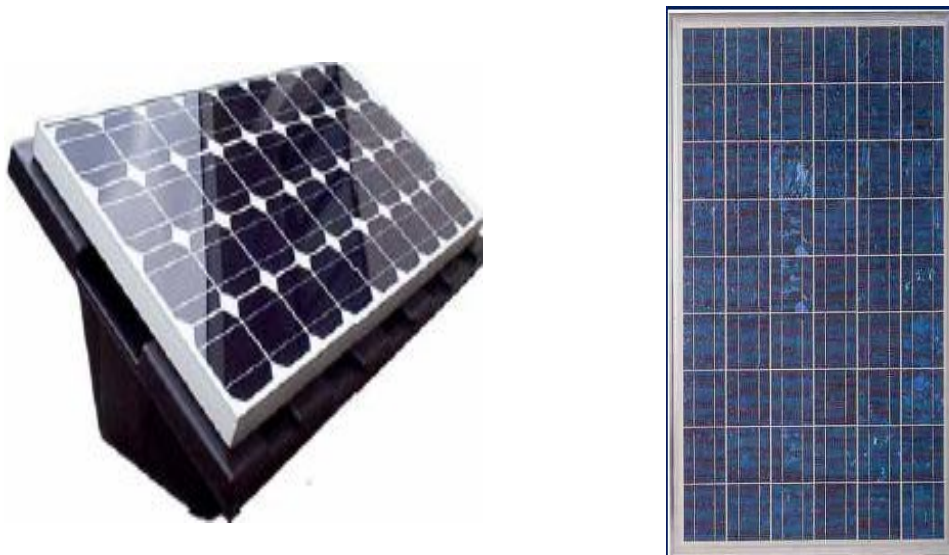


Figure. II.4 : *Le module photovoltaïque*

I.4 Les différentes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque :

I.4.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire:

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [10].

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure. II.5 [11].

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [12].
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [12].

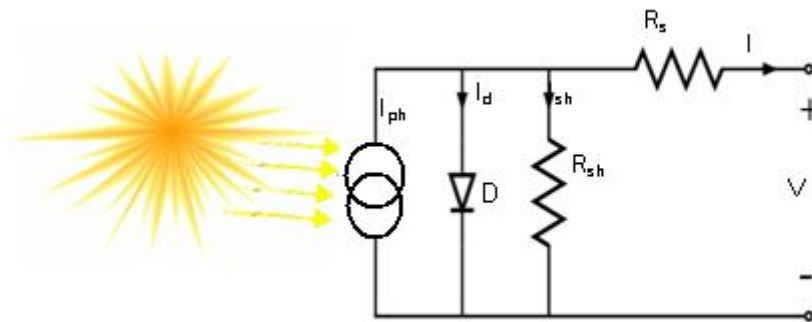


Figure II.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.

Ce modèle est présenté par un ensemble d'équations, d'une complexité modérée. Il reflète le comportement de la cellule solaire (I_{ph} et I_d), déduit du circuit de la Figure II.5 (one-diode), en prenant en considération les dépendances suivantes [13]:

- courant de saturation I_0 des cellules comme fonction de la température;
- courant I_{ph} , comme fonction de la température aussi;

• ainsi que la résistance série R_s , qui donne une forme plus précise entre le point de puissance maximale et la tension du circuit ouvert, comme étant aussi fonction de la température.

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : la somme de tous les courants entrant et sortant d'un point est égale à zéro).

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \quad (II.1)$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.2)$$

Connaissant l'équation d'une diode

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{qV_d}{nKT}} - 1 \right] \quad (II.3)$$

Avec :

V_d : la tension de la diode

$$V_d = V + R_s I \quad (II.4)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par:

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

on en déduit l'expression du courant fournit par une cellule solaire

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V + R_s I)}{nKT}} - 1 \right] - \left[\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (II.6)$$

I : le courant fournie par la cellule [A].

V : la tension au borne de la cellule [V].

I_{ph} : photocourant [A].

I_0 : courant de saturation de la diode [A].

R_s : résistance série [Ω].

R_{sh} : résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

q : la charge de l'électron = $1.602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

K : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k.

α : le facteur d'idéalité de la jonction p-n, il détermine la déviation des caractéristiques des cellules à partir de la jonction idéale p-n,

T : est la température absolue de la cellule

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut négliger le courant délivré dans R_{sh} . On obtient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) \quad (II.7)$$

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T_{ref}) (1 + a(T - T_{ref})) \quad (II.8)$$

$$I_{Ph}(T_{ref}) = I_{sc}(T_{ref}) \frac{G}{G_0} \quad (II.9)$$

où G et G_0 : sont les éclairements de fonctionnement et normalisé respectivement;

a : le coefficient de température du courant I_{ph} (mA/C°)

T_{ref} : la température aux conditions normalisées (référence).

$$a = \frac{(I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_{ref}))}{I_{sc}(T_{ref})(T_2 - T_{ref})} \quad (II.10)$$

I_0 : est le courant de saturation; qui lui aussi est une fonction des températures T et T_{ref} .
Ce courant est donné par:

$$I_0 = I_{0(T_{ref})} (T/T_{ref})^3 e^{\frac{-qE_g}{nK(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}})}} \quad (II.11)$$

Où:

$$I_{0(T_{ref})} = \frac{I_{sc(T_{ref})}}{\left(e^{\frac{qV_{oc(T_{ref})}}{nKT_{ref}}} - 1 \right)} \quad (II.15)$$

$I_{sc}(T_{ref})$: le courant de court circuit de la cellule à la température ambiante T;

E_g : est l'énergie de la bande interdite du matériel de la cellule en eV (1.16eV pour le silicium et 1.75eV pour l'amorphe)

$V_{oc}(T_{ref})$:est la tension du circuit ouvert à la température T;

L'obtention de l'expression de R_s , en fonction de T et d'autres paramètres de la cellule, est déduite à partir de la dérivation de l'équation (II.7) ; ce qui donne l'équation (II.16) :

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{oc}} - \frac{1}{X_V} \quad (II.16)$$

$$X_V = I_{0(T_{ref})} \frac{q}{nKT_{ref}} e^{\frac{qV_{oc(T_{ref})}}{nKT_{ref}}} \quad (II.17)$$

I.4.2 la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque:

La figure II.6 montre la caractéristique courant-tension (I-V) pour une cellule photovoltaïque. Ainsi, si une résistance variable R aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminée par l'intersection de la caractéristique I-V de la cellule avec la courbe de la charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente $1/R$. Par conséquent, la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe. Le courant I varie peu en fonction de la tension (il est presque égale au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CD. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I, la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température.

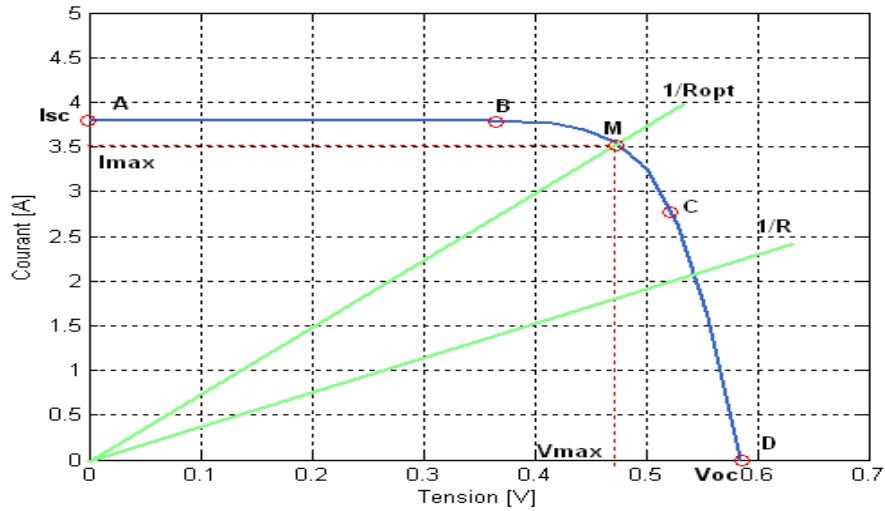


Figure II.6 : Caractéristique tension-courant d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule peut être caractérisée par les paramètres principaux, présentés aussi dans la figure II.6:

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

- **la tension à vide** : correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le photo courant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$), $I = 0$. cette tension peut être exprimée mathématiquement par:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (II.18)$$

Où

$V_t = \frac{nKT}{q}$: est la tension thermique et T est la température absolue de la cellule.

- **le point de puissance maximale** est le point de fonctionnement M (V_{max} , I_{max}) dans la figure II.6, pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.

- **le rendement maximal** est le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{AG} \quad (II.19)$$

où

P_{in} : est la puissance incidente, G ou E est l'éclairement et A est la surface de la charge et le produit de I_{sc} et V_{oc} :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (II.20)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7. Il diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [14].

I.5 Générateur photovoltaïque :

Pour éviter toute confusion entre les paramètres mathématiques de la cellule et du panneau solaire la notation suivante est utilisée : l'exposant 'P' réfère aux paramètres du panneau et l'astérisque, c'est utilisé pour la cellule. La tension globale du panneau est notée par V^P et le courant global est I^P . Le modèle mathématique du panneau est obtenu en remplaçant chaque cellule par son circuit équivalent, privé de la résistance parallèle R_s^P car son influence sur les caractéristiques de la cellule est très faible.

Le courant I^P , en fonction des paramètres caractéristiques du panneau est donné par :

$$I^P = I_{sc}^P \left[1 - \exp \left(\frac{V^P - V_{oc}^P + R_s^P I^P}{N_s V_t^c} \right) \right] \quad (II.21)$$

Avec :

Le courant de court-circuit du panneau $I_{sc}^P = N_s I_{sc}^c$

La tension en circuit ouvert du panneau $V_{oc}^P = N_s V_{oc}^c$

La résistance série équivalente $R_s^P = R_s^c N_s$

La tension thermique de la cellule $V_t^c = \frac{aKT^c}{q}$

I.6 Caractéristiques tension-courant et puissance-tension sous différentes conditions climatiques :

I.6.1 Influence de l'éclairement :

La figure II.7 présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

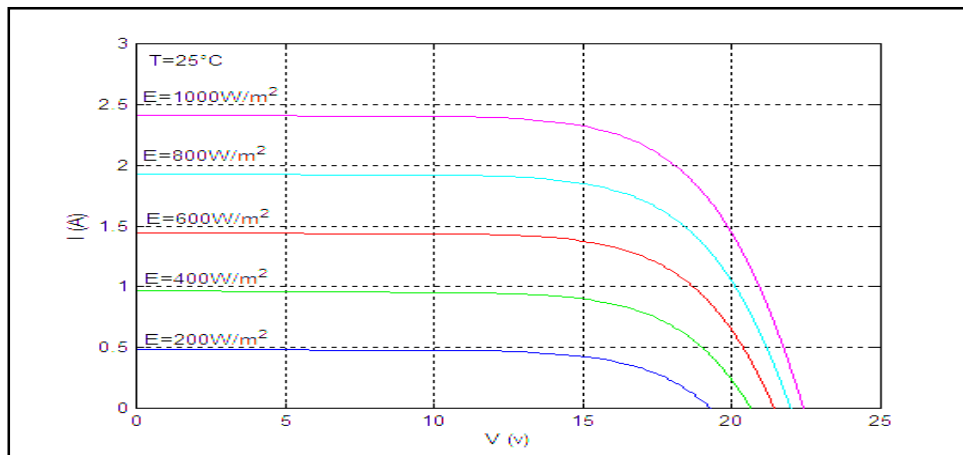


Figure II.7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique $I - V$

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [5]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

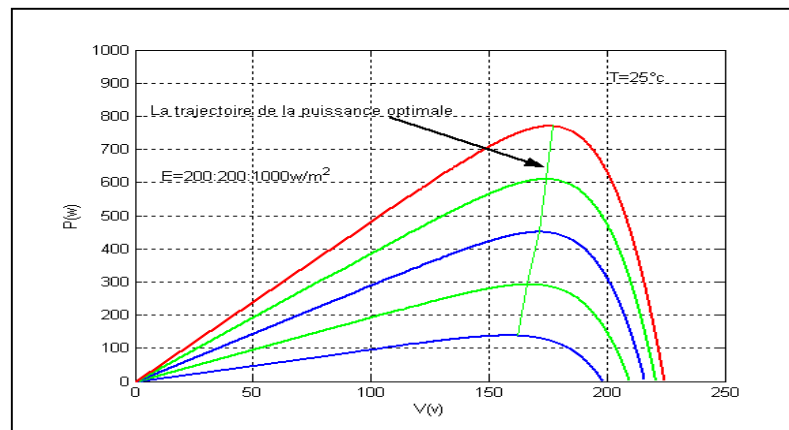


Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique électrique $P - V$

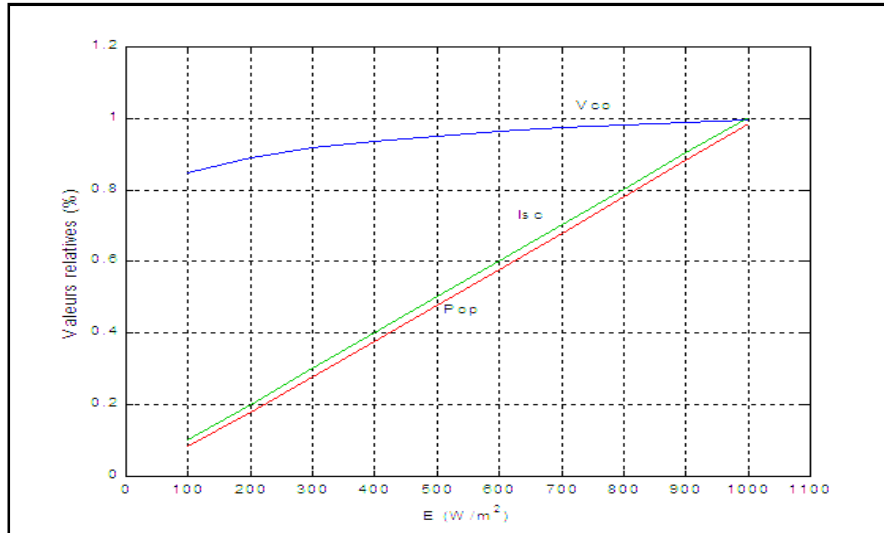


Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur V_{co} , I_{sc} et P_{op}

I.6.2 Influence de la température :

La figure II.10 présente des courbes courant tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV:

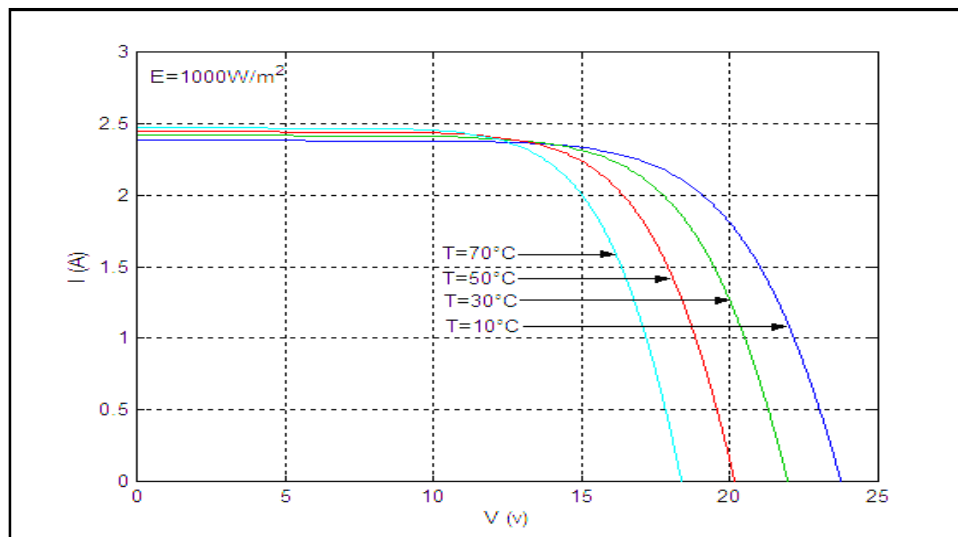


Figure II.10 : Influence de la température sur la caractéristique électrique $I-V$

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [5]. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

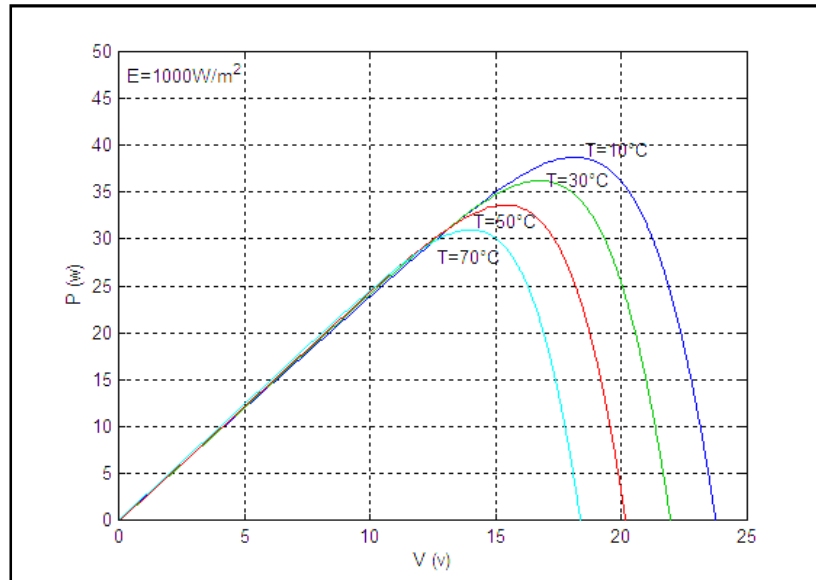


Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique électrique P-V

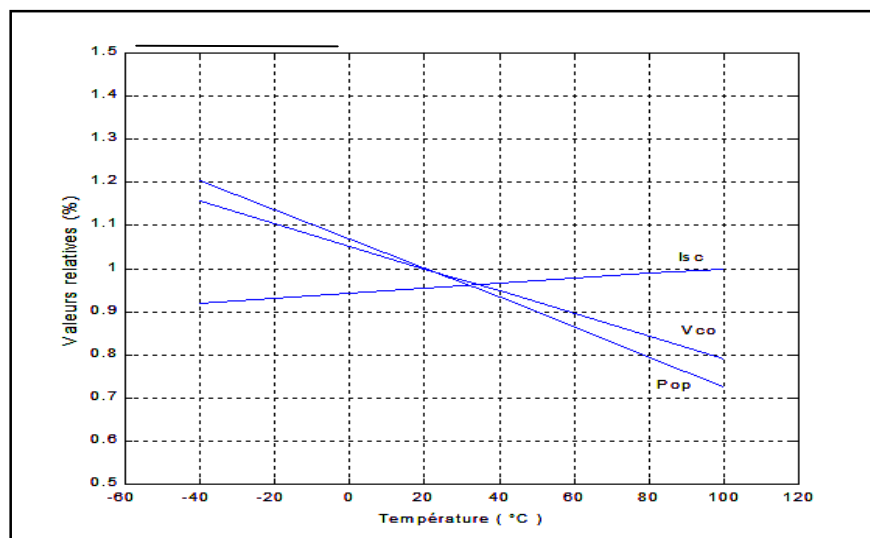


Figure II.12: Influence de la température sur I_{sc} , V_{co} , P_{op}

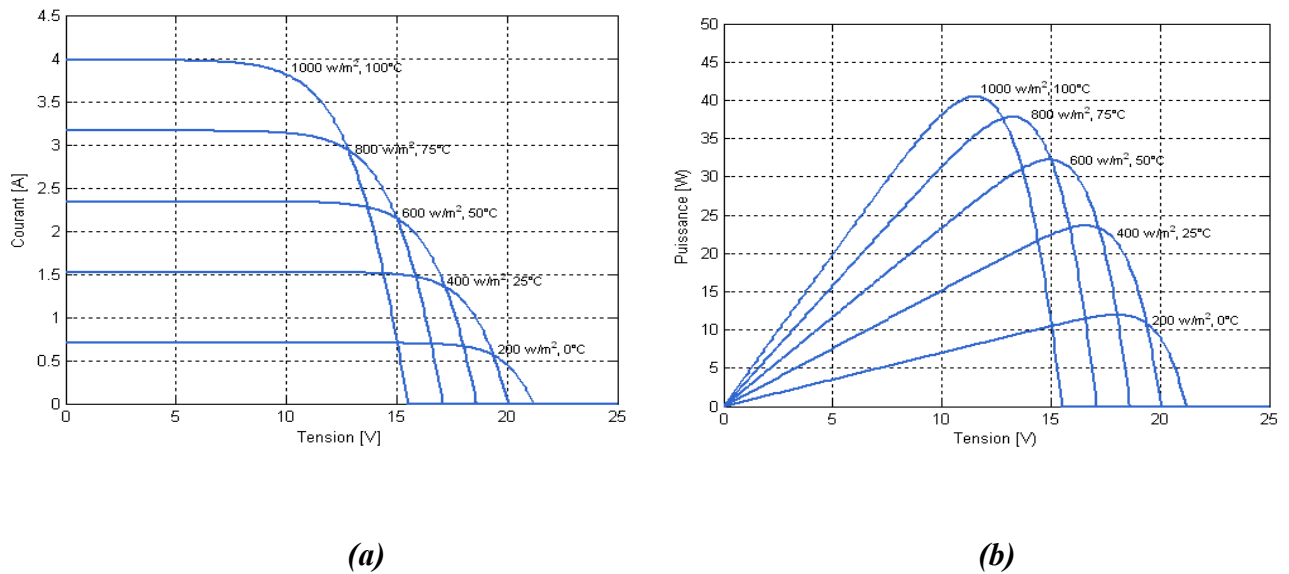


Figure II.13 : Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairagements et températures. a) courant-tension b) tension-puissance

I.6.3 Influence du facteur d'idéalité :

Théoriquement, le facteur d'idéalité n des cellules poly-cristallines prend une valeur entre 1 et 2, tout en étant près de la valeur de 1 par rapport aux courants élevés, il augmente jusqu'à la valeur 2 pour des courants faibles. Pour un fonctionnement normal, il est généralement égal à 1.3. La courbe de la figure II.14, affirme la notification précédente.

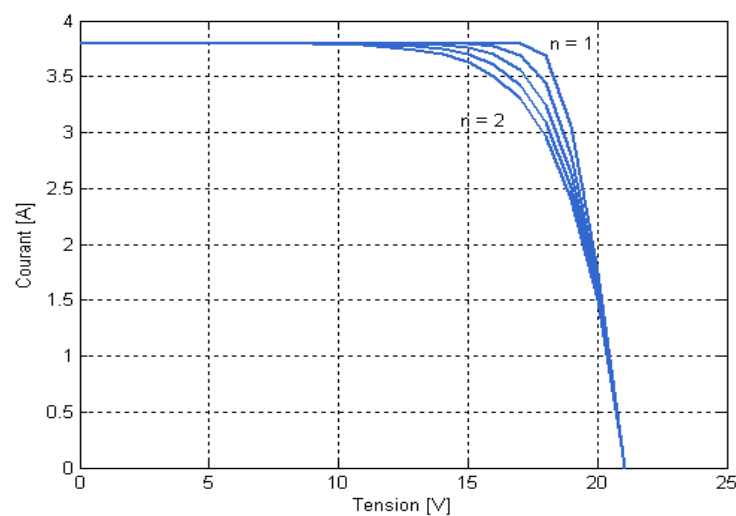


Figure II.14 : Influence de facteur d'idéalité.

I.7 Classification d'un system photovoltaïque :

I.7.1 Système photovoltaïque autonomes :

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif [15].

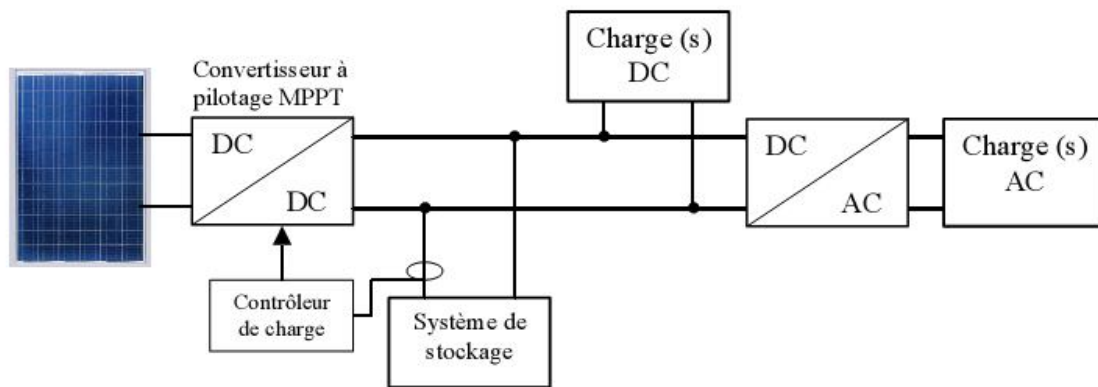


Figure II.15 : *Installation photovoltaïque autonome*

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales ,où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits. [16]

I.7.2 Système photovoltaïque raccordé à un réseau :

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins. [15]

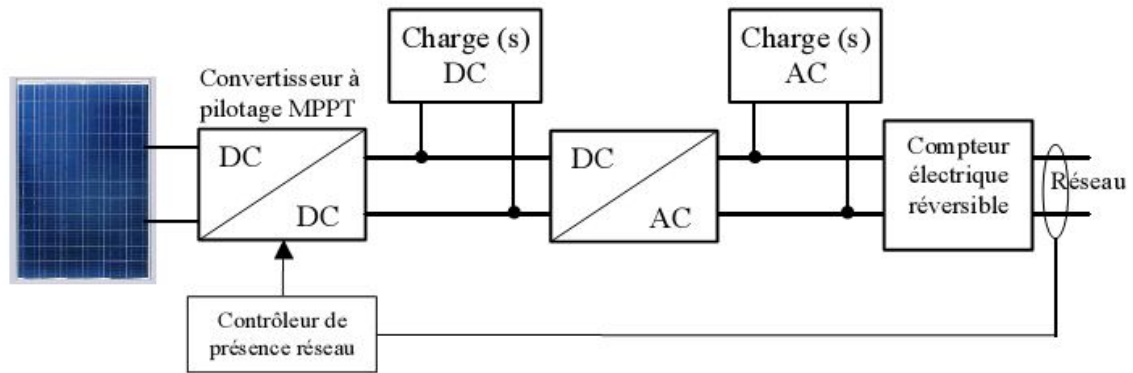


Figure II.16 : Installation photovoltaïques couplée au réseau.

I.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.8.1 Avantages : [18]

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milli Watt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions

I.8.2 Inconvénients : [18]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10–15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a représenté le principe de la cellule photovoltaïque et les caractéristiques de Générateur PV et des cellules ses Performances des contrôles, les systèmes photovoltaïques, leurs avantages et leurs inconvénients, le chapitre suivant nous allons étudié une méthode d'optimisation de photovoltaïque MPPT.

Chapitre III



*La méthode de la
poursuite du point de
puissance
maximale(MPPT)*

III.1 Introduction :

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et du faible rendement des dispositifs de conversion photons-électrons mis en oeuvre (entre 12 et 17 %), le développement de cette énergie à grande échelle nécessite avant tout une amélioration de ces systèmes de telle sorte qu'ils puissent fonctionner, à tout instant, à leur puissance maximale.

En effet, les études en simulation dans le chapitre précédent ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

Pour remédier à cette dernière influence, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit les conditions climatiques. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT) [12].

Dans ce contexte, nous allons exposer succinctement les différentes architectures de la chaîne de conversion PV, MPPTs, ainsi que le principe de la poursuite du PPM. Ensuite nous allons consacrer une partie de ce chapitre sur une méthode de commande la plus couramment utilisée de nos jours dite Perturbation et observation (P&O).

III.2 La Connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance :

Les connexions direct du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, figure III.1. Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur. [16]

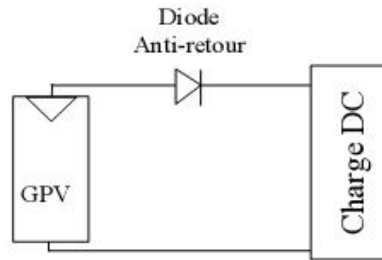


Figure III.1 Connexion directe GPV-charge via une diode anti-retour

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du GPV et celle de la charge. Comme la caractéristique de la figure montre, la puissance transmise directement à une batterie ou charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectué à la puissance maximale P_{MAX} que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . Autre application direct est le pompage d'eau « au fil du soleil ». dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge. [16]

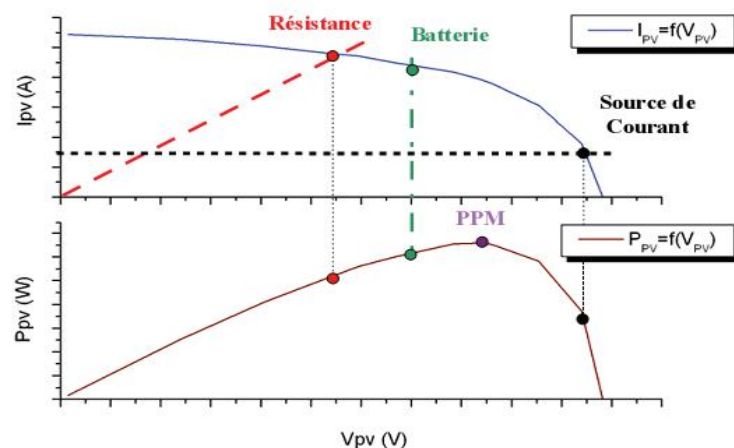


Figure III.2 Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe GPV-charge.

III.3 La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation :

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque (V_{oc}). Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure III.3 est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge. [17]

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire.
- Introduire une isolation galvanique.
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative.

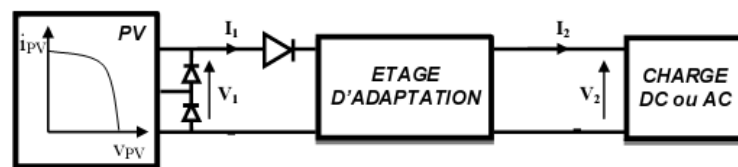


Figure III.3 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage

d'adaptation une commande appelée MPPT qui effectue une recherche permanente du PPM. [17]

III.4 Principe de la recherche du point de puissance maximale :

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [17].

La figure III.4 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

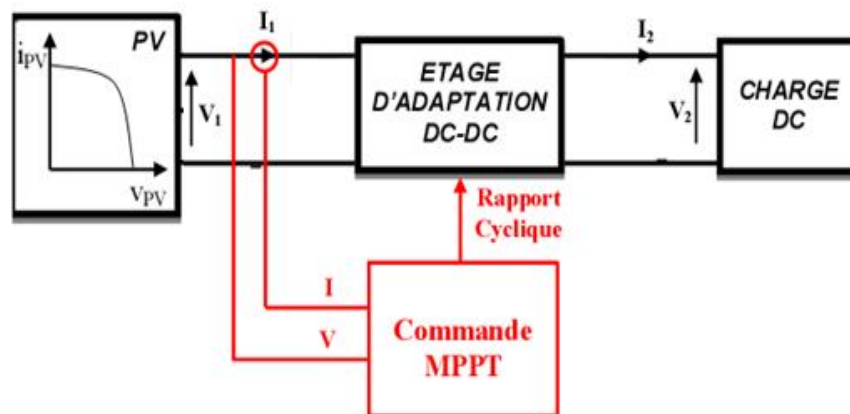
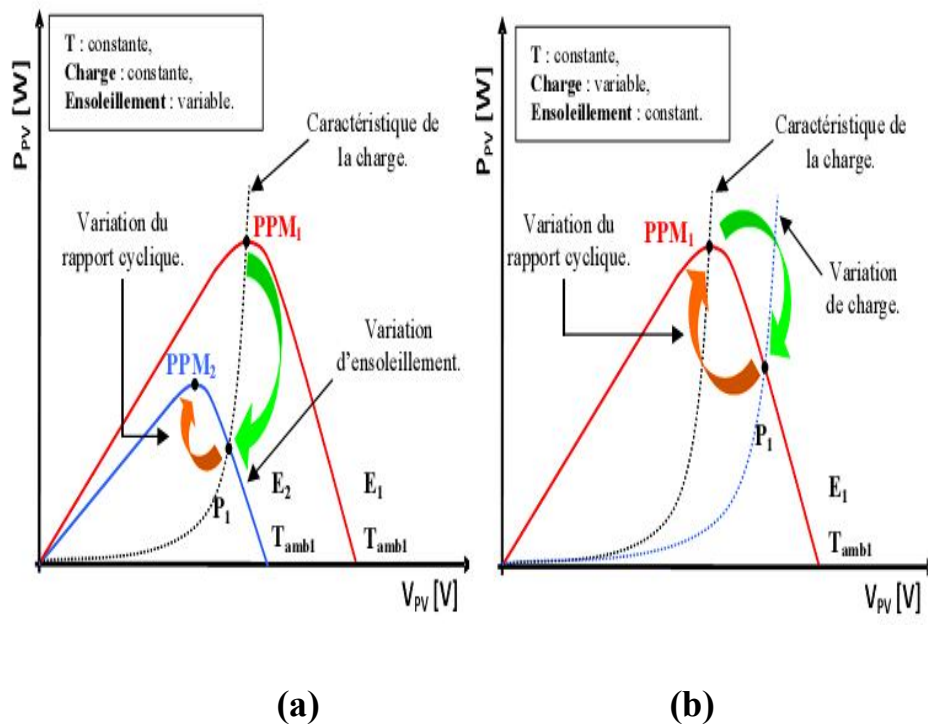
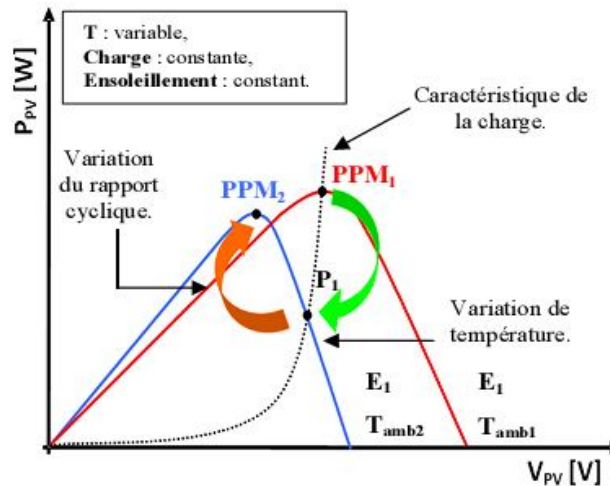


Figure III.4 : Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure III.5 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM_2 . Pour une variation de la charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.





(c)

Figure III.5 Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

a) suit à une variation d'ensoleillement,

b) suite à une variation de charge,

c) suite à une variation de température.

III.5 Critères d'évaluation d'une commande MPPT :

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM [17].

La puissance effectivement P délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{MPPT} , permet de mesurer l'efficacité de la commande. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (III.1)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

• **Simplicité et coût :**

Complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

• **Réponse dynamique :**

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

• **Flexibilité :**

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux des différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

• **Compétitive sur une large gamme de puissance :**

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quelque soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

III.6 Rendement de la chaîne de puissance :

Pour avoir une idée plus précise sur les origines des pertes dans une chaîne de conversion solaire ; des rendements de chaque partie de la chaîne ont été définis. Pour cela, le rendement total de celle-ci a été décomposé en divers types de rendements reliés spécifiquement à chaque partie de la chaîne.

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté η_{PV} est défini selon l'équation (II.19).

La puissance P effectivement délivrée par un générateur PV va dépendre de la commande utilisée dans le convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle que nous notons η_{MPPT} permet de mesurer l'efficacité de la commande. En fait on peut l'appeler aussi rendement de la commande.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (III.2)$$

Où P_{MAX} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie de panneau, il dépend des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques.

Enfin, le rendement du convertisseur noté η_{CONV} généralement fourni par les documents constructeurs est défini par l'équation (III.3), en notant P_s la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

$$\eta_{CONV} = \frac{P_s}{P_e} \quad (III.3)$$

Le rendement total de la chaîne de conversion (III.4) peut être défini le produit de ces trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV} \quad (III.4)$$

III.7 La commande MPPT perturbation puis observation :

III.7.1 Principe des commandes "perturbation et observation" (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure III.6, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses

analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [17].

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

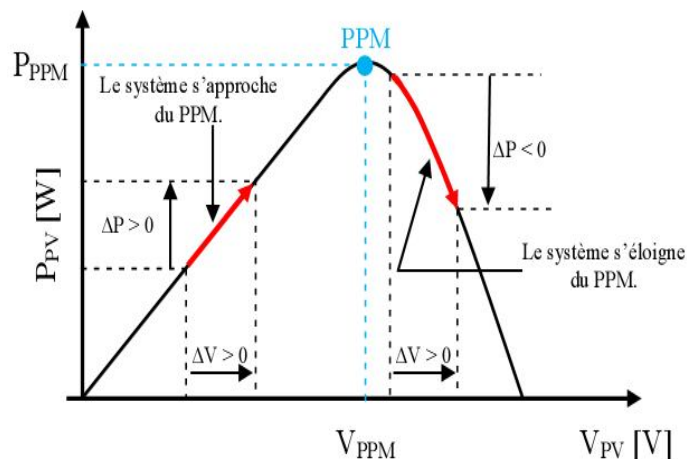


Figure III.6 Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire.

III.7.2 Structure de l'algorithme P&O :

La figure III.7 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

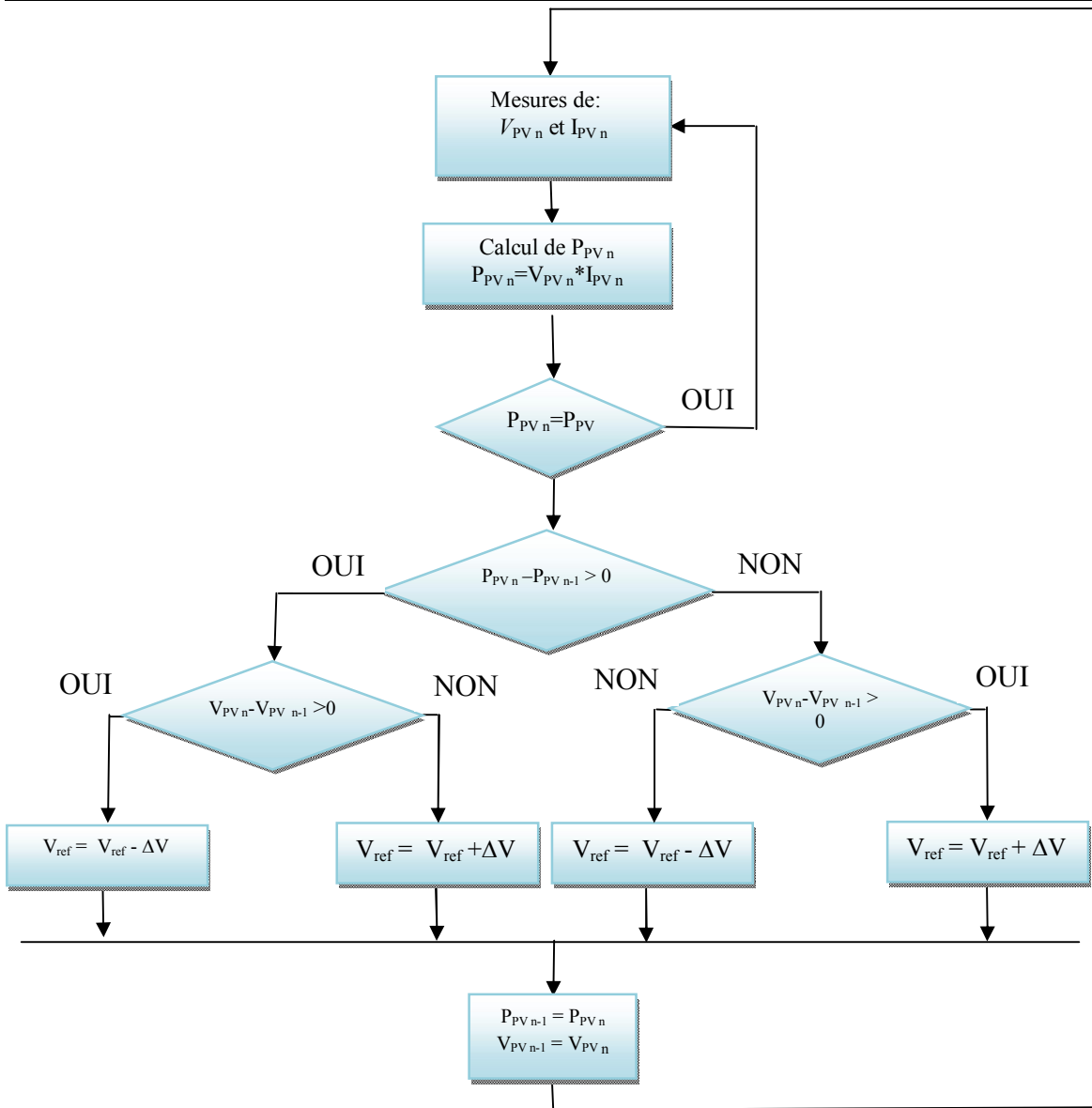


Figure III.7 Algorithme de la méthode P&O.

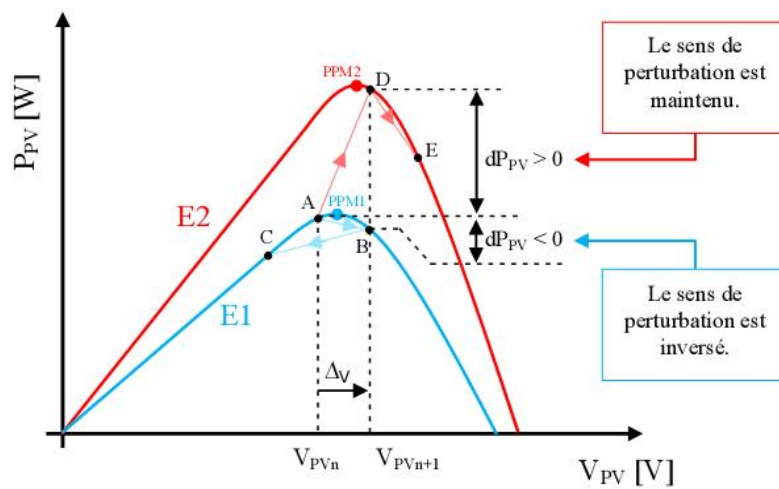


Figure III.8 Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure III.8.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E_1 , avec un point de fonctionnement se situant en A. suite à une perturbation de tension de valeur ΔV , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion

Du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. on peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques $P(V)$ du module de E_1 à E_2), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance momentanée.

Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables de fortes lacunes au niveau de la commande.

III.8 Application (MPPT) : Simulations en temps réel :

D'abord, pour simuler le système, il est nécessaire d'utiliser les données d'ensoleillement et température d'une location spécifique durant 24 heures. Cette simulation permet de tester le modèle d'une manière suffisante. Pour cela, nous avons choisi les données à travers la région de Bechar, Algérie et les données météorologiques pour une journée type de chaque saison sont regroupées les tableaux suivants.

Les données géographiques de Bechar sont :- Latitude : 31,38N - Longitude : 2,15W [19].

1^{er} test : (Saison Hiver -Janvier-)

Tableau III.1: Les données météorologiques pour une journée type de saison hiver (janvier).

Heure	$G(W/m^2)$	$T_j (^{\circ}C)$
06:00	0	6
07:00	0	6
08:00	5.2	7
09:00	227.77	9
10:00	620.1	17
11:00	800.12	18
12:00	833.34	19.6
13:00	760.12	20.1
14:00	638.89	21
15:00	520.2	21.4
16:00	170.89	19.4
17:00	2.77	19.7
18:00	0	16.7
19:00	0	15
20:00	0	14
21:00	0	13

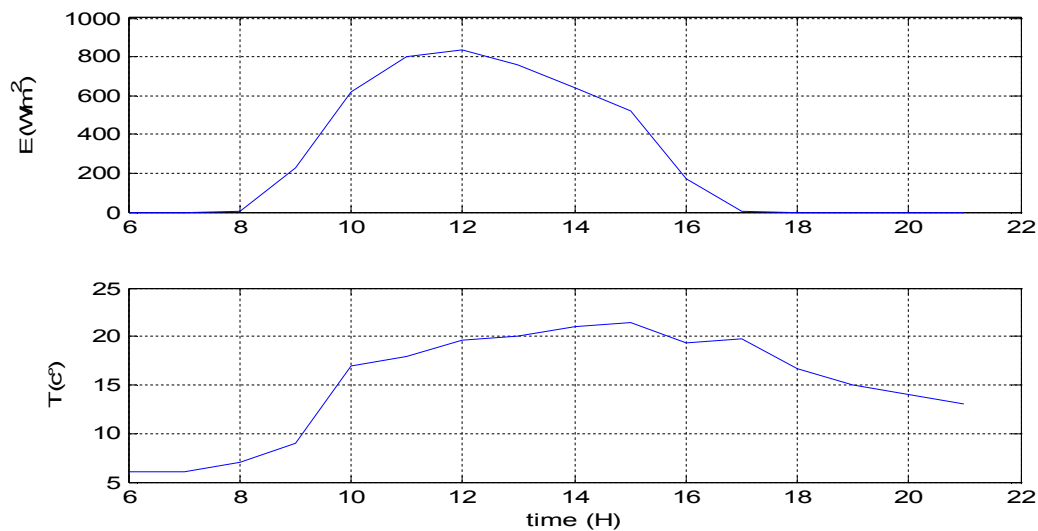


Figure III.9: Les conditions climatiques d'un jour à partir de saison hiver (janvier).

Les figures III.9 montrent respectivement l'évaluation de la tension, courant optimaux et la puissance effectués par la commande MPPT au cours d'un jour d'hiver (Janvier).

Il est clair sur la figure III.9 et III.10 que la variation du courant optimal suit l'éclairement. Il augmente un peu en début de matinée. Par contre, en milieu de journée le point de fonctionnement du panneau PPM diminue.

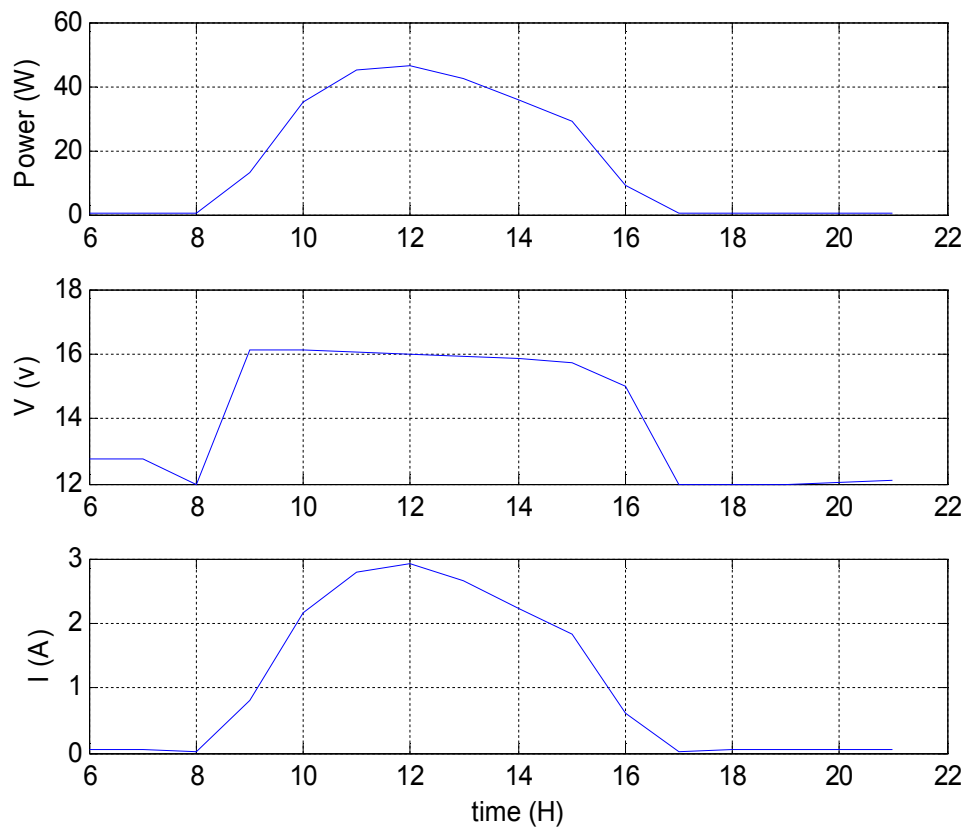


Figure III.10: Les grandeurs électriques (P , V , I) optimaux d'un jour à partir de saison hiver (janvier).

Tableau III.2 : *Les caractéristiques électriques en fonction du temps.*

Heure	I(A)	V(v)	P(w)
06:00	0.0344	12.7600	0.4393
07:00	0.0344	12.7600	0.4393
08:00	0.0175	12.0000	0.2102
09:00	0.7999	16.1450	12.9150
10:00	2.1735	16.1350	35.0699
11:00	2.7974	16.0850	44.9964
12:00	2.9120	15.9600	46.4755
13:00	2.6583	15.9300	42.3475
14:00	2.2378	15.8400	35.4465
15:00	1.8238	15.7450	28.7151
16:00	0.5990	15.0200	8.9964
17:00	0.0046	12.0000	0.0546
18:00	0.0335	12.0000	0.4020
19:00	0.0340	12.0000	0.4086
20:00	0.0343	12.0150	0.4121
21:00	0.0343	12.1050	0.4155

2^{eme} test : (Saison Printemps - Mars-)

Tableau III.3 : *Les données météorologiques pour une journée type de saison Printemps (Mars).*

Heure	G($\frac{W}{m^2}$)	T _j (°C)
06:00	5.54	13.2
07:00	7.22	13.4
08:00	120.85	13
09:00	236.11	12.8
10:00	540.84	13.9
11:00	850.29	14.9
12:00	927.78	16.8
13:00	925	18
14:00	820	19.8
15:00	672.22	21
16:00	510.22	21
17:00	230.8	21
18:00	150	21
19:00	1.2	16.8
20:00	0	16
21:00	0	16

Donc de même manière du simulation le technique précédemment, il est nécessaire d'utiliser les données d'ensoleillement et température d'une location spécifique durant 24 heures. Et pour choisi les même données à travers la région Béchar en Mars

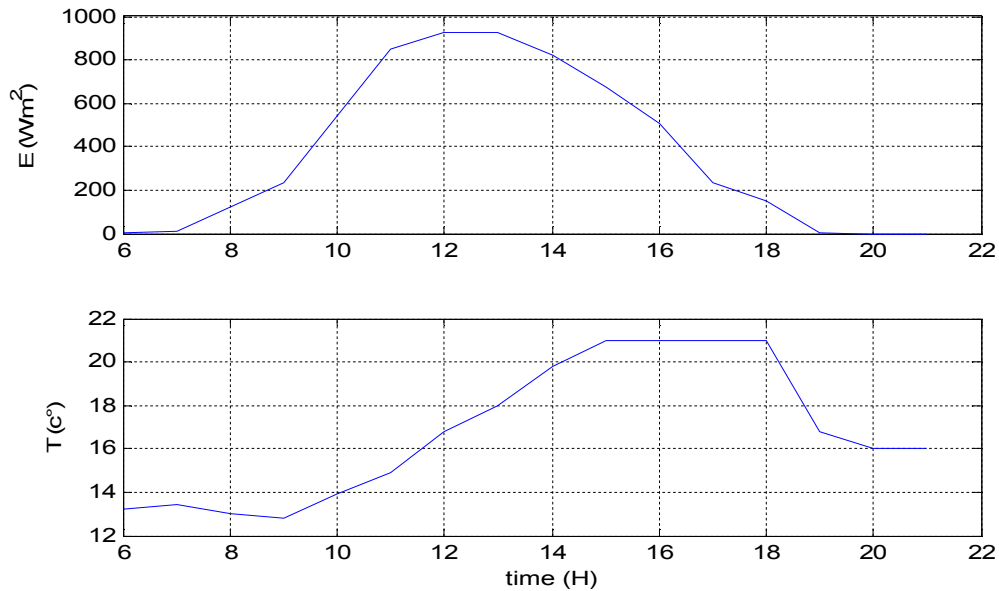


Figure III.11: Les conditions climatiques d'un jour à partir de saison Printemps (Mars).

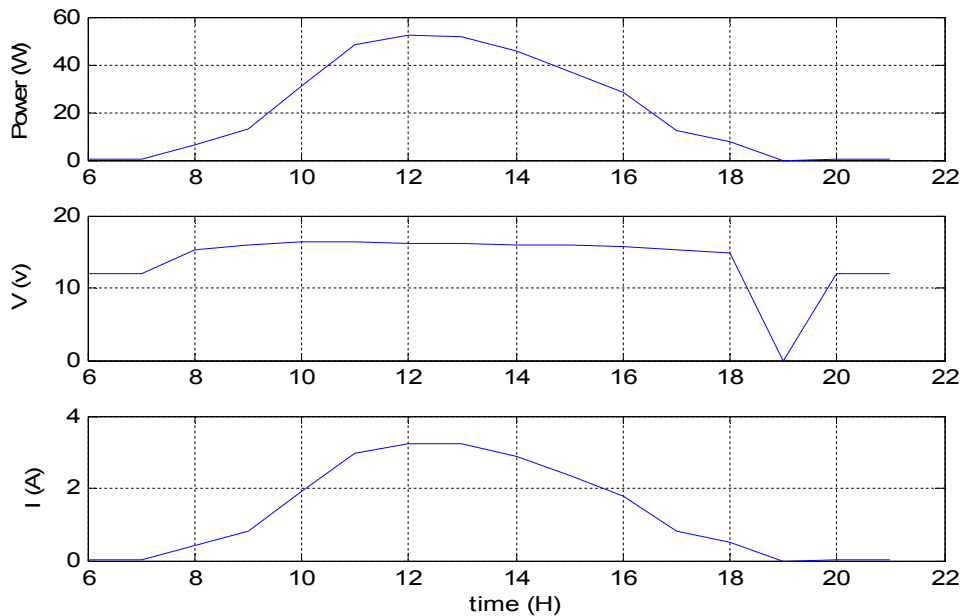


Figure III.12: Les grandeurs électriques (P , V , I) optimaux d'un jour à partir de saison Printemps (Mars).

Tableau III. 4: *Les caractéristiques électriques en fonction du temps.*

Heure	I(A)	V(v)	P(w)
06:00	0.0175	12.0000	0.2095
07:00	0.0238	12.0000	0.2861
08:00	0.4232	15.1800	6.4242
09:00	0.8290	15.8700	13.1570
10:00	1.8978	16.3300	30.9913
11:00	2.9723	16.3050	48.4632
12:00	3.2385	16.1450	52.2858
13:00	3.2280	16.0600	51.8410
14:00	2.8653	15.9500	45.7016
15:00	2.3536	15.8500	37.3042
16:00	1.7892	15.7650	28.2075
17:00	0.8095	15.1900	12.2968
18:00	0.5251	14.7550	7.7483
19:00	0	0	0
20:00	0.0337	12.0000	0.4048
21:00	0.0337	12.0000	0.4048

3^{eme} test : (Saison Eté - Juillet-) (une journée ensoleillée)

Tableau III.5: *Données météorologiques pour une journée type de saison Eté (Juillet)*

Heure	G(W/m^2)	T_j (°C)
06:00	8.33	27
07:00	180.2	28.8
08:00	520	30
09:00	650	33.1
10:00	760	33.8
11:00	850	34.2
12:00	975	34.6
13:00	970	35.9
14:00	950	36.5
15:00	800	37.5
16:00	680.89	38.2
17:00	510.48	37.9
18:00	227.77	37
19:00	100.8	35.5
20:00	16.2	35
21:00	0	34.4

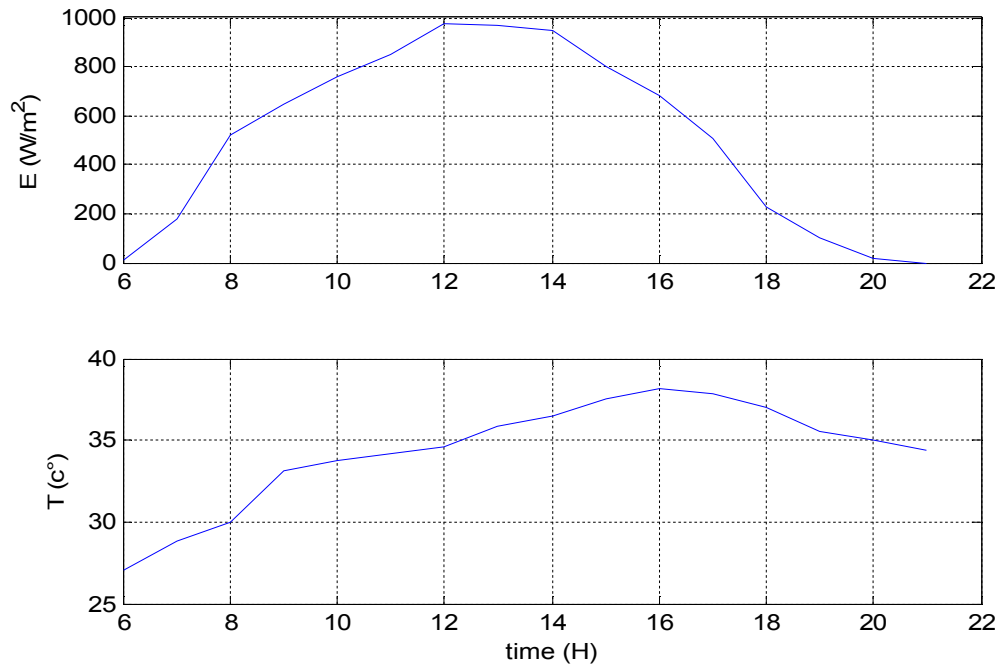


Figure III.13: Données d'ensoleillement et température d'un jour à partir de saison Eté (Juillet)

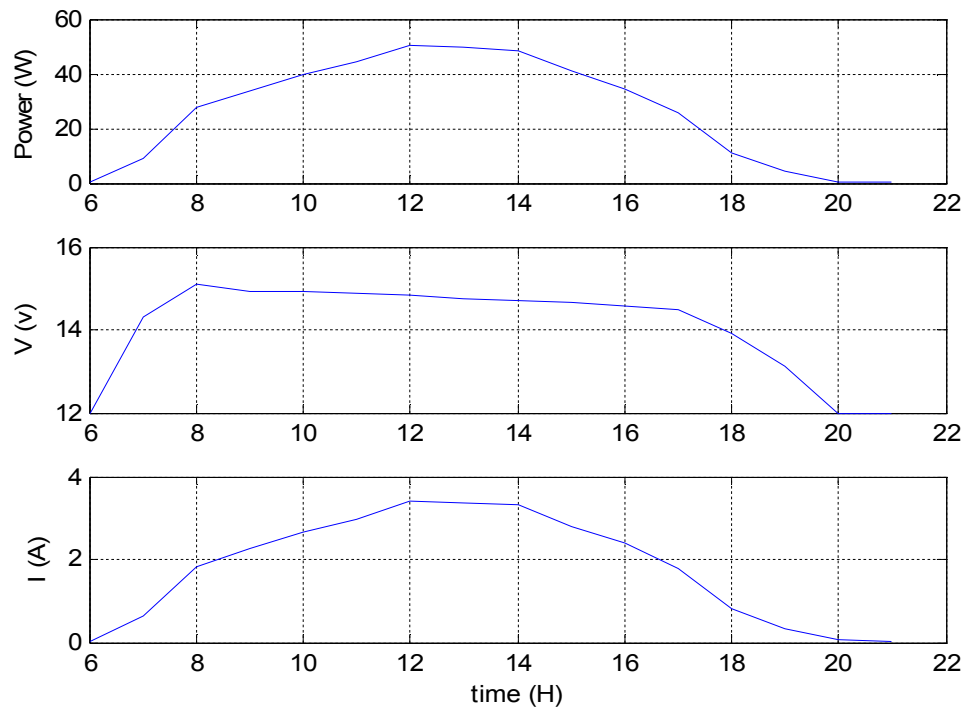


Figure III.14: Les grandeurs électriques (P , V , I) optimaux d'un jour à partir de saison Eté (Juillet)

Tableau III.6: *Les caractéristiques électriques en fonction du temps.*

Heure	I(A)	V(v)	P(w)
06:00	0.0220	12.0000	0.2635
07:00	0.6305	14.3150	9.0251
08:00	1.8205	15.0900	27.4710
09:00	2.2711	14.9400	33.9296
10:00	2.6503	14.9200	39.5423
11:00	2.9601	14.8900	44.0760
12:00	3.3863	14.8450	50.2696
13:00	3.3686	14.7500	49.6873
14:00	3.2990	14.7150	48.5454
15:00	2.7857	14.6500	40.8112
16:00	2.3747	14.5750	34.6120
17:00	1.7838	14.4850	25.8385
18:00	0.7959	13.9050	11.0665
19:00	0.3506	13.1000	4.5925
20:00	0.0453	12.0000	0.5436
21:00	0.0220	12.0000	0.2637

4^{eme} test : (Saison Automne -Octobre-)

Tableau III. 7: *Données météorologiques pour une journée type de saison Automne (Octobre)*

Heure	G($\frac{W}{m^2}$)	T _j (°C)
06:00	0	17.4
07:00	6.9	19
08:00	89	21
09:00	294.4	24
10:00	510.22	26.7
11:00	830	27
12:00	900	28.3
13:00	880.27	30.2
14:00	830	30
15:00	627.78	29.6
16:00	481	28
17:00	230.65	27.8
18:00	97.223	27.8
19:00	20.01	26
20:00	1	25
21:00	0	23.4

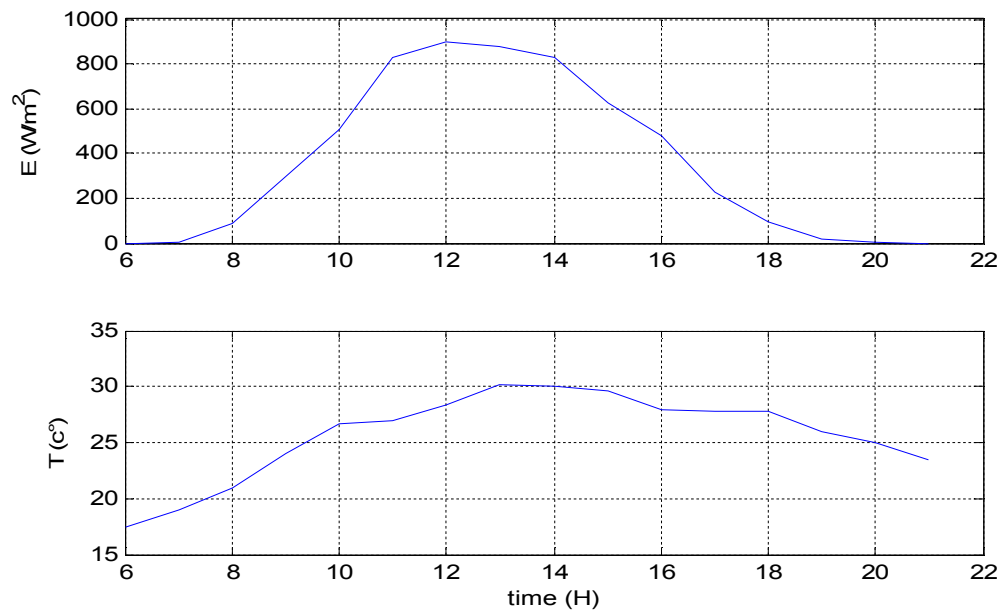


Figure III.15: Les conditions climatiques d'une journée automnale (Octobre)

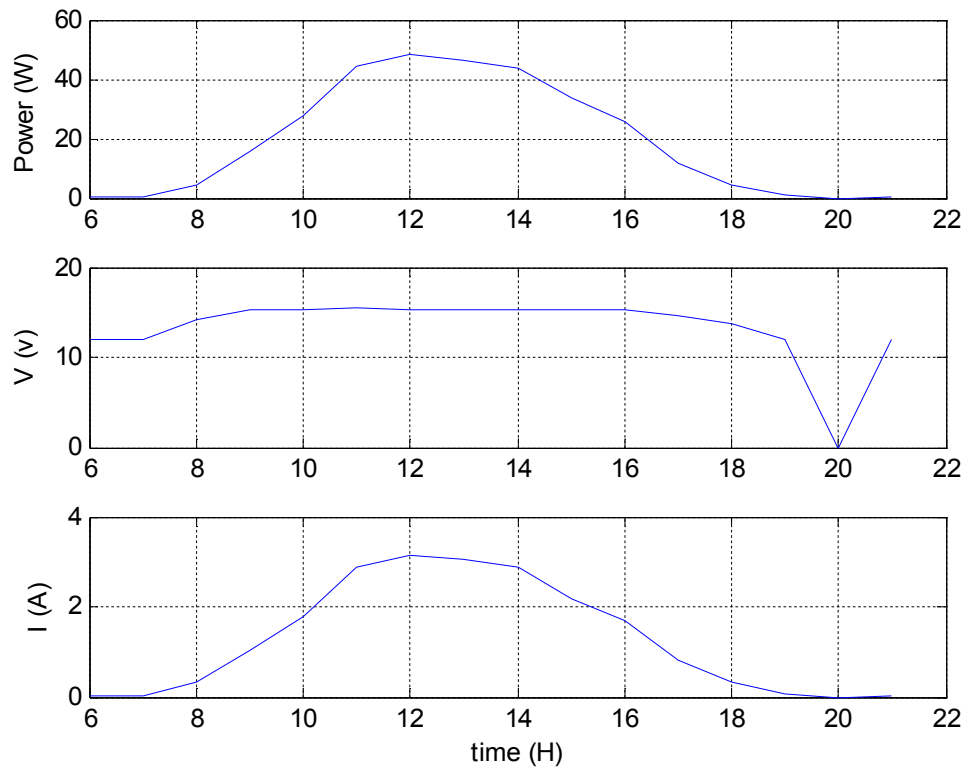


Figure III.16: Les grandeurs électriques (P , V , I) d'une journée automnale (Octobre)

Tableau III.8: *Les caractéristiques électriques d'une journée automnale*

Heure	I(A)	V(v)	P(w)
06:00	0.0333	12.0000	0.3991
07:00	0.0207	12.0000	0.2488
08:00	0.3107	14.1550	4.3979
09:00	1.0325	15.1700	15.6636
10:00	1.7877	15.3300	27.4053
11:00	2.8958	15.4200	44.6540
12:00	3.1357	15.3150	48.0229
13:00	3.0666	15.1800	46.5512
14:00	2.8940	15.2000	43.9885
15:00	2.1959	15.1900	33.3559
16:00	1.6849	15.2050	25.6185
17:00	0.8080	14.6450	11.8337
18:00	0.3389	13.6950	4.6414
19:00	0.0677	12.0000	0.8121
20:00	0	0	0
21:00	0.0306	12.0000	0.3672

On remarque à partir des tests précédentes qu'en début de matinée comme en soirée, le module PV fournit une puissance très faible comparable avec une journée ensoleillée où le système fonctionne mieux sous ses conditions. Toutefois, la diminution significative de l'énergie produite est peut-être liée aux autres facteurs (neige par exemple).

De toute évidence, le système fonctionne beaucoup mieux dans des conditions ensoleillées. Les données utilisées pour la journée nuageuse ont laissé tomber la puissance maximale de PV d'environ 80%, indiquant que le maximum de deux pouvoirs consécutifs de journées nuageuses peuvent être traités par le système. Toutefois, étant donné la diminution importante de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, il peut avoir été un autre facteur (la neige par exemple) qui n'aurait pas eu une telle question à une latitude plus basse. Par conséquent, je recommande que des simulations soient exécutées pour

plusieurs scénarios de plus par jour nuageux. En outre, une simulation dans laquelle journée nuageuse est suivie par une journée ensoleillée peut nous donner une idée de la rapidité de système serait en mesure de répondre à condition normale.

III.9 Conclusion :

Dans le présent en chapitre nous avons abordé les bases de poursuite la puissance maximale. Après avoir donné un aperçu sur les différents modes de connexion du GPV- Charge et types de commandes MPPT. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'étude de l'algorithme P&O de types numérique.

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque pour différentes valeurs d'insolation et de température, ont été obtenus en utilisant le contrôleur MPPT de l'algorithme P&O peut s'avérer nécessaire dans le cas de brusques changements de des conditions climatiques.

Chapitre IV



***Modélisation et
simulation du système***

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation et observation ». Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur «boost», une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2 L'outil Matlab/Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [20].

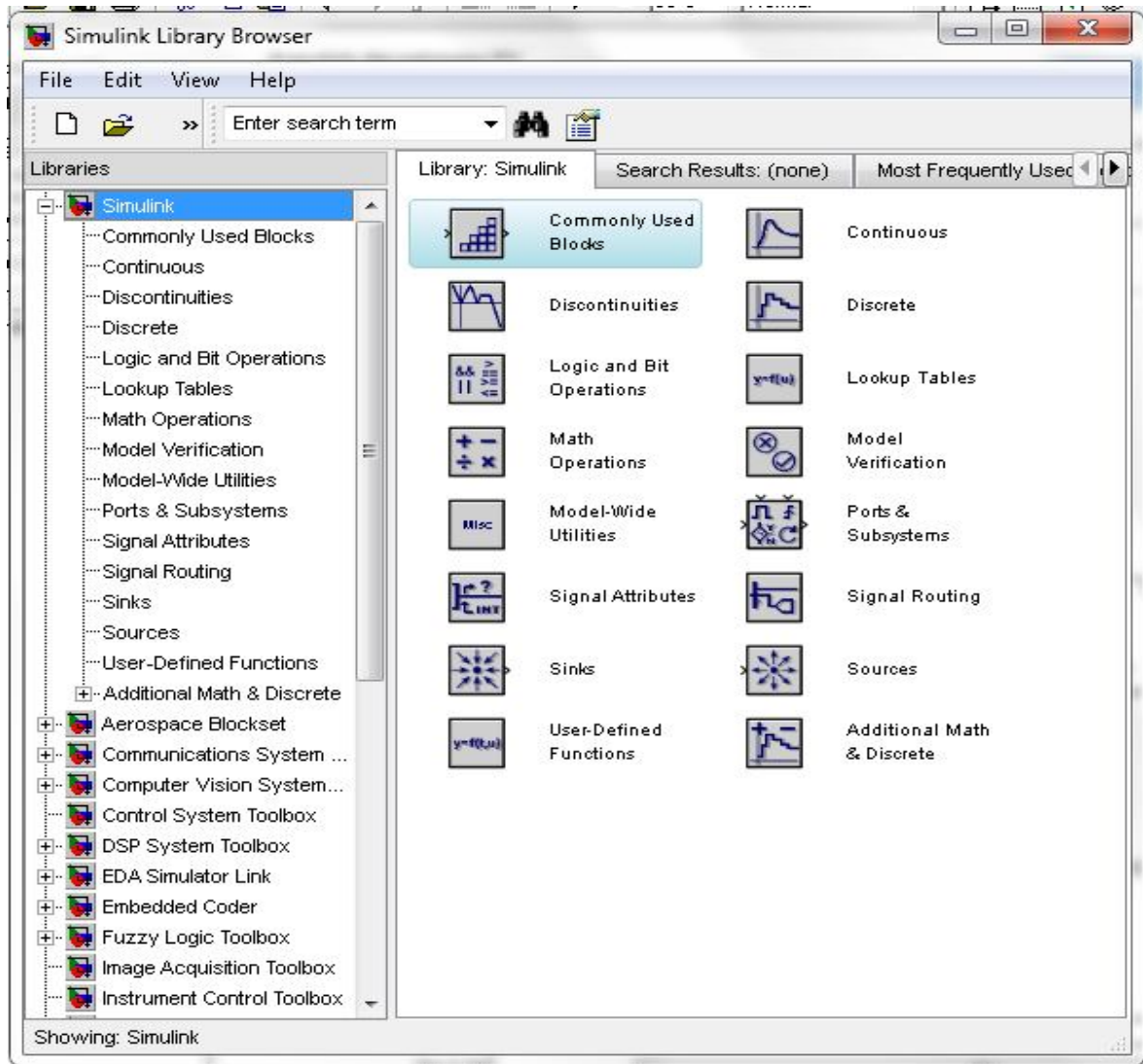


Figure IV.1 : Bibliothèque simulink

IV.3 Système photovoltaïque proposée :

La figure IV.2 représente le schéma synoptique d'un système PV alimente une charge résistive R_s :

- Le générateur PV est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 85W, un courant de 4.95 A sous une tension optimale de 17.2 V.
- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17 V.

- La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

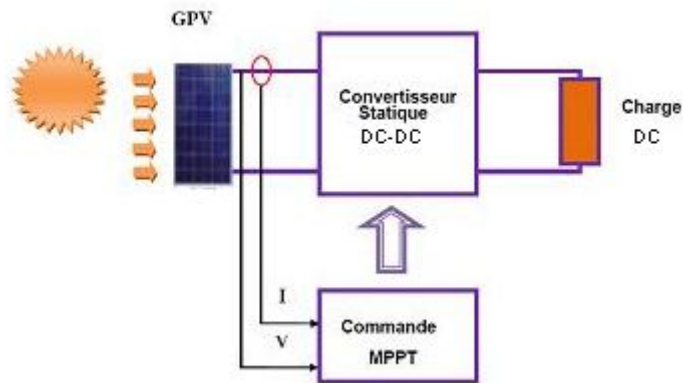


Figure IV.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)

IV.4 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

IV.4.1 Modelisation du GPV:

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non

Linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexion set une résistance parallèle R_p caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (IV.3) :

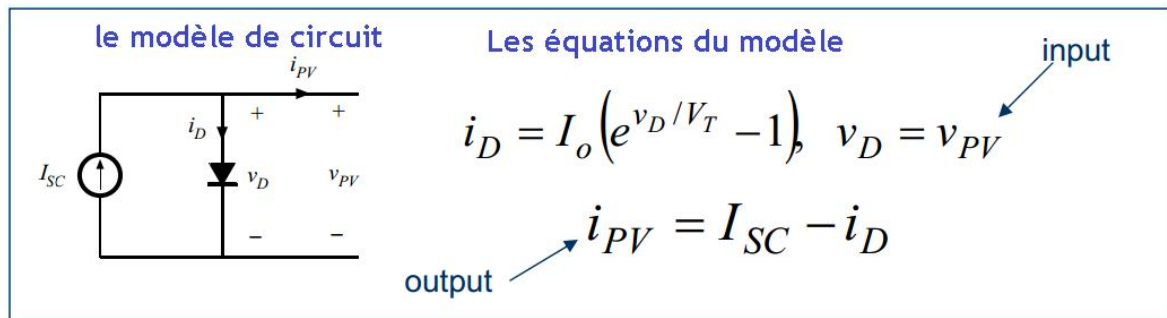


Figure IV.3: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

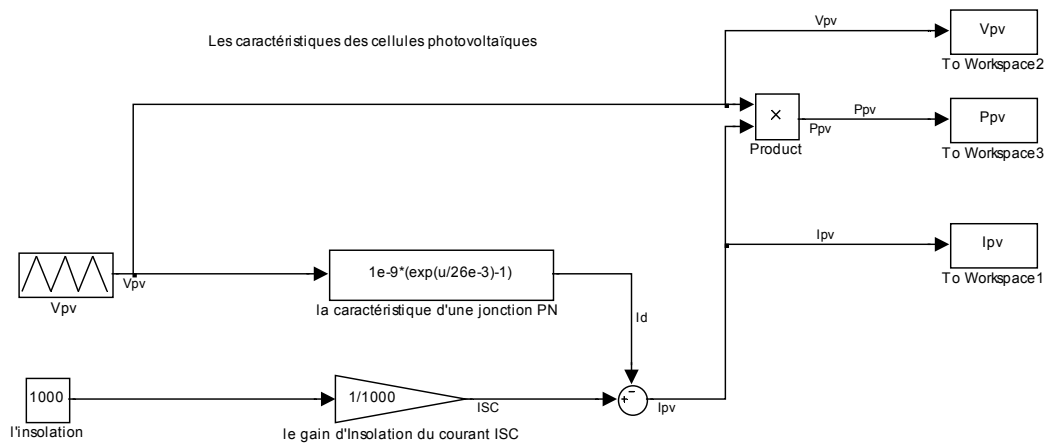


Figure IV.4 : Le modèle simulink d'une simple cellule PV

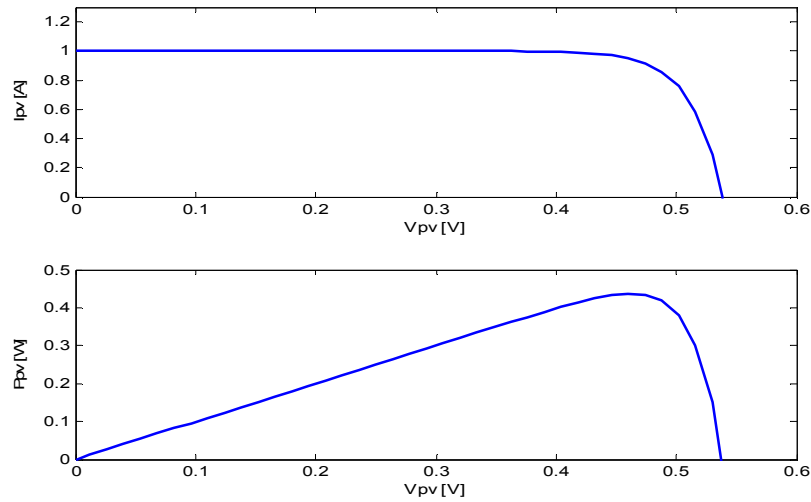


Figure IV.5 : Les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques

La figure IV.5 représenté le courant de sortie I_{PV} en fonction de V_{PV} et la puissance de sortie P_{PV} (soit le produit de I_{PV} et V_{PV}) en fonction de V_{PV} .

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc figure (IV.6) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont [20] : l'ensoleillement dans le plan des panneaux $E_s (W/m^2)$, température de jonction des cellules $T_j (^\circ C)$ et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV $I_s (A)$, tension aux bornes du GPV $V_s (V)$.

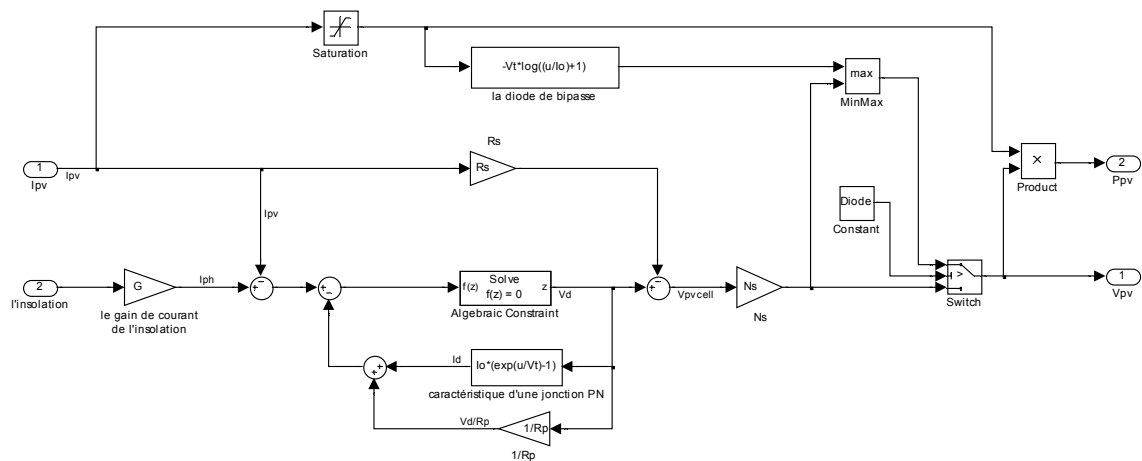


Figure IV.6 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque

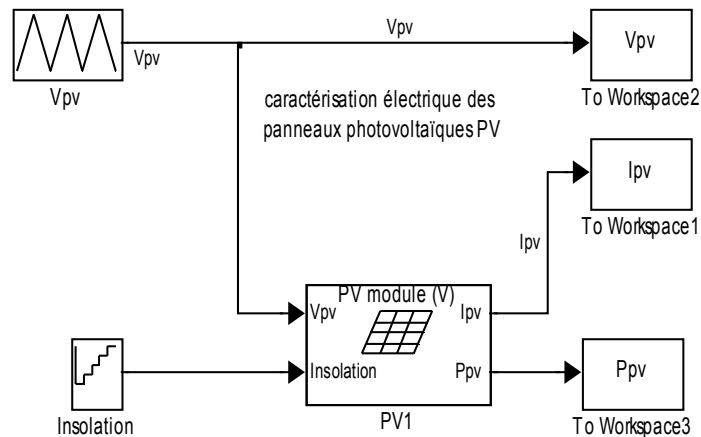


Figure IV.7 : Caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques PV
(Insolation = 200, 400, 600, 800, 1000 W/m²)

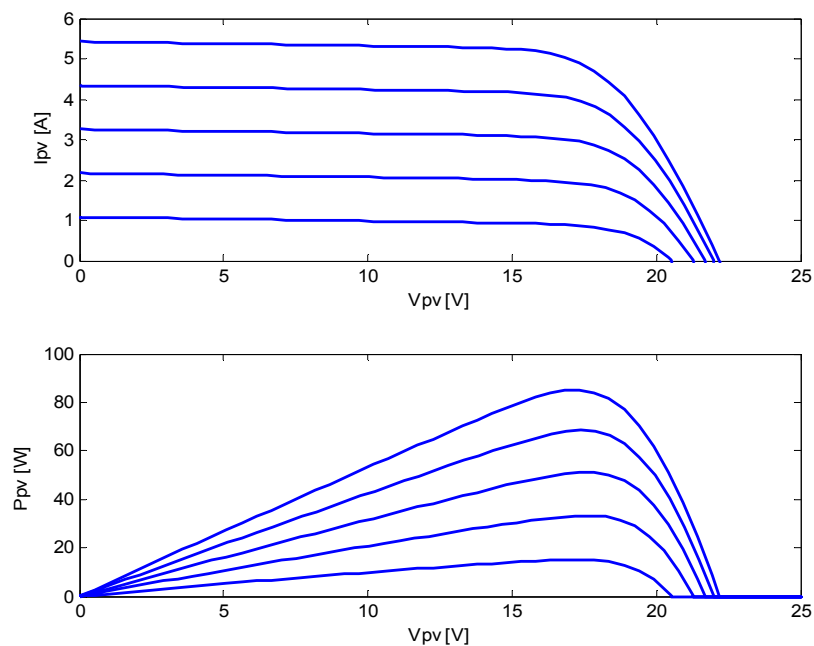


Figure IV.8 : Caractérisation I-V et P-V des générateur photovoltaïques PV en fonction l'ensoleillement.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant:

Tableau IV.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau dans les conditions standards «CST»

éclairage standard, G	1000W/m ²
Température standard, T	25°C
Puissance maximale P_{max}	85 W
Tension à P_{max} ou tension optimale (V_{opt})	17.2 V
Courant à P_{max} ou tension optimale (I_{opt})	4.95 A
Courant de court-circuit I_{sc}	5.45 A
Tension à circuit ouvert V_{co}	22.2 V
Nombre des cellules en séries	36

IV.4.2 Simulation du générateur PV :

Le schéma de chaînes des générateurs photovoltaïques connectés en série en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par :

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par la figure IV.9. Cette figure représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension d'un chaînes des générateurs photovoltaïques.

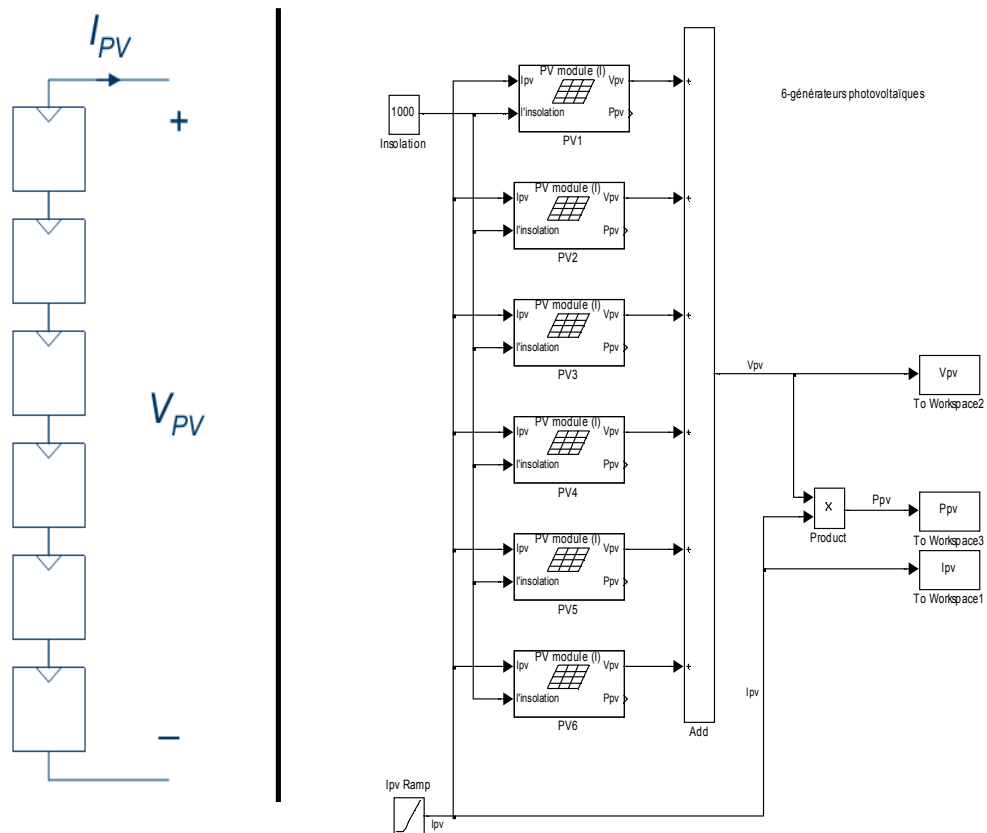


Figure IV.9 : Photovoltaïque composé de 6 générateurs photovoltaïques connectés en série en MATLAB-SIMULINK

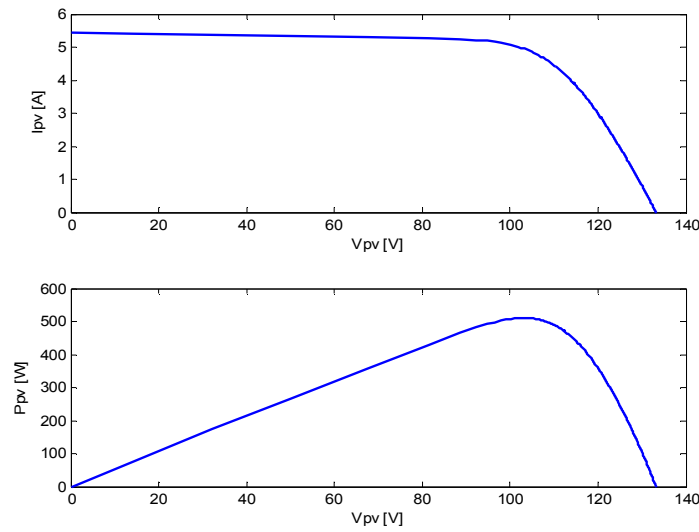


Figure IV.10 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension.

IV.5 Modélisation et simulation du hacheur survolteur :

IV.5.1 Modélisation de 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 caractérisé par son rapport cyclique α ($0 < \alpha < 1$) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure IV.10 [21].

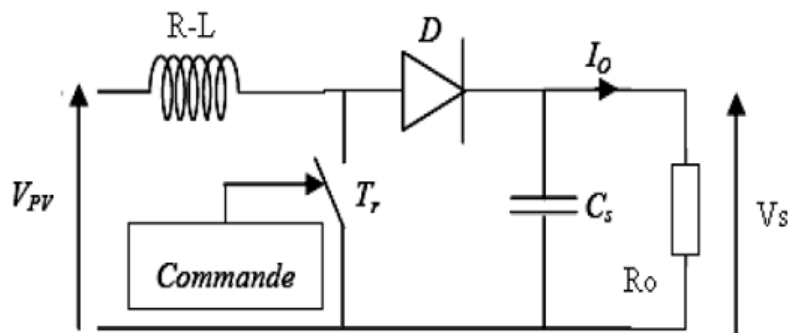


Figure IV.11 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, le système d'équations devient

$$\begin{cases} I_L = I_e \\ I_s = (1 - \alpha)I_L \\ V_e = (1 - \alpha)V_s \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{PV} et I_{PV}) en fonction du rapport cyclique α du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure IV.2) par le système d'équations:

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \\ I_s = (1 - \alpha)I_e = (1 - \alpha)I_{PV} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

A partir le système d'équations (IV.2), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{PV}) en fonction de α et R_s :

$$R_{PV} = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{(1-\alpha)V_s}{I_s/(1-\alpha)} = R_s(1-\alpha)^2 \quad (\text{IV.3})$$

Alors, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{PV} et R_s :

$$\frac{R_{PV}}{R_s} = (1 - \alpha)^2 \Rightarrow \alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{PV}}{R_s}} \quad (\text{IV.4})$$

Puisque le rapport α est vérifié l'inégalité $0 < \alpha < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante :

$$R_s > R_{PV} \quad (\text{IV.5})$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau ($R_{PV} = R_{opt}$) et le rapport cyclique ($\alpha = \alpha_{opt}$) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - \alpha_{opt})^2 R_s \quad (\text{IV.6})$$

La relation (III.6) montre que, pour une puissance incidente P , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (α_{opt}) (point PPM).

IV.5.2 Simulation de hacheur survolteur :

La figure IV.11 représente le schéma block d'un convertisseur survolteur

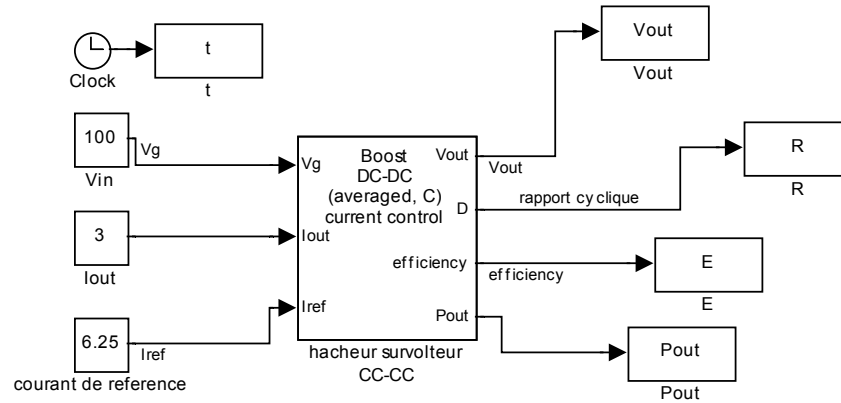


Figure IV.12: Schéma block d'un convertisseur survolteur

On commande le rapport cyclique (α) à partir la valeur $V_{PV} = V_s$ à l'aide d'un comparateur on obtient en sortie le signal de commande illustré dans la figure IV.12.

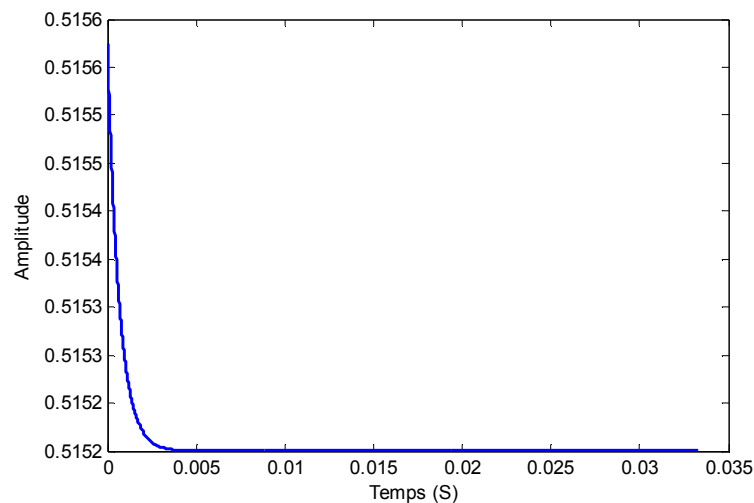


Figure IV.13 : Signal commande DC/DC (gâchette d'hacheur).

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (IV.13) à (IV.15). Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur

survolteur ainsi le puissance de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

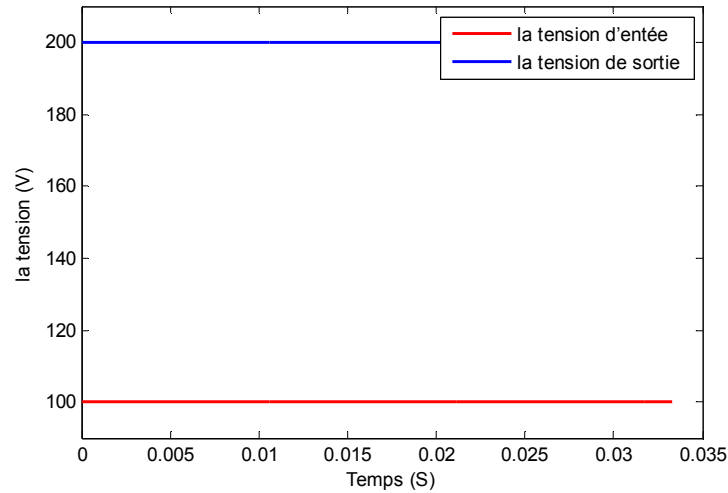


Figure IV.14 : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur.

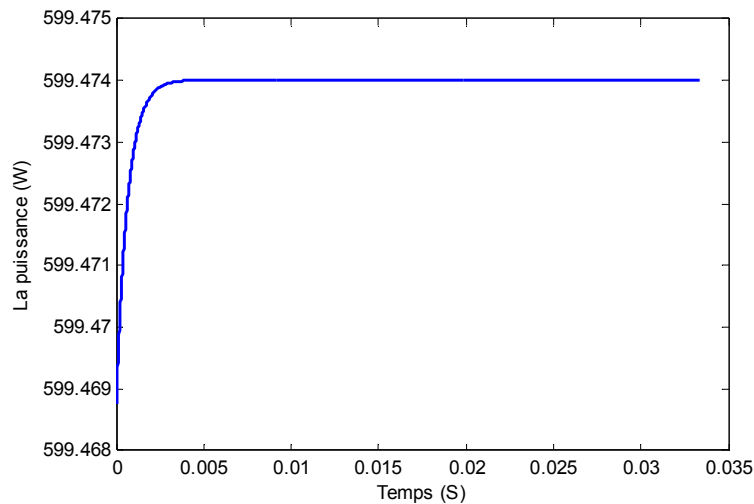


Figure IV.15 : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la puissance de sortie d'hacheur survolteur.

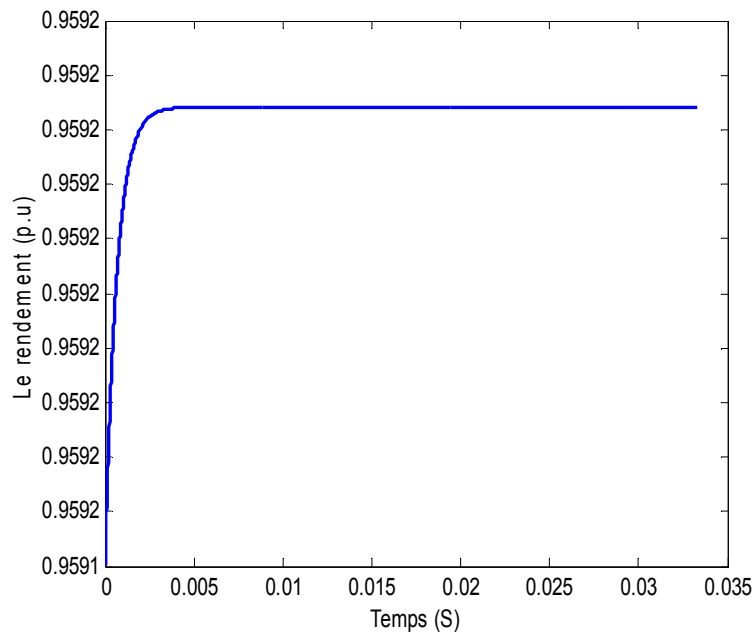


Figure IV.16 : *Le rendement de l'hacheur survolteur.*

IV.6 Structure et simulation de la commande MPPT «P&O» :

IV.6.1 structure de la commande «perturbation et observation» :

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge.

Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [20].

La méthode de perturbation et d'observation «P&O» est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement.

Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. Sur la figure (IV.15), on a représenté le schéma synoptique de la méthode de perturbation et d'observation.

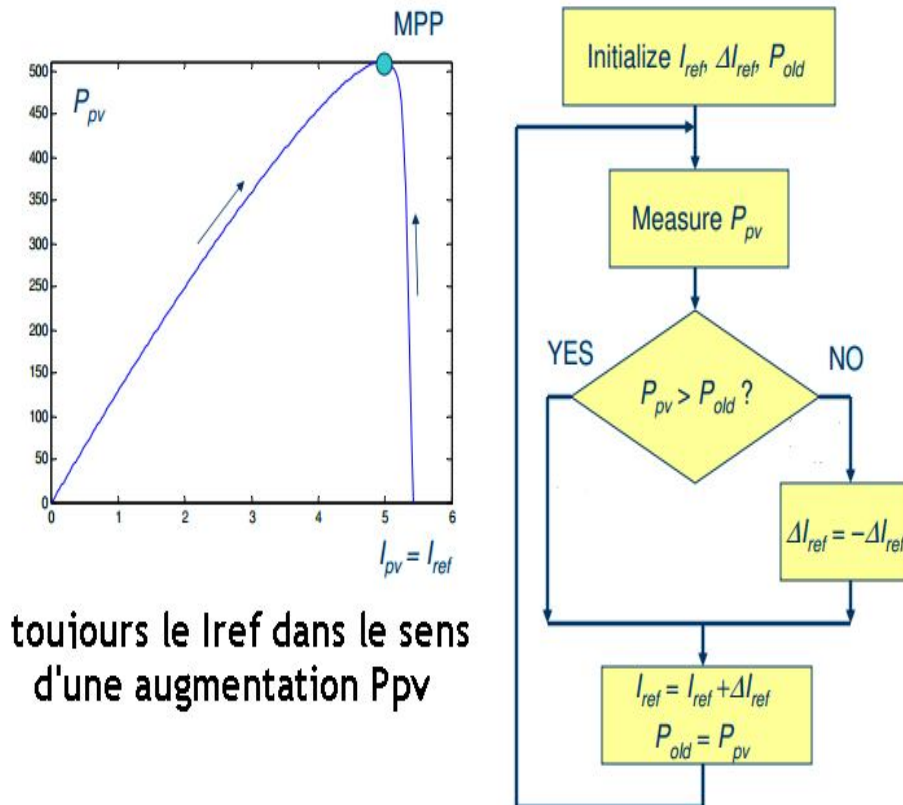


Figure IV.17 : Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation» (p&o)

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique« perturbation-observation »qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.

IV.6.2 l'algorithme de la méthode MPPT:

Partie initialisation de l'algorithme perfectionné de la fonction MPPT tracking:

```
% Initialize MPPtrackIref%
global Iref;
global Increment;
global Pold;
Pold = 0; % initial value for the sensed power
Iref = 4; % initial value for the current reference
Increment = -1; % initial direction: decrease reference current
```

L'algorithme MPPT tracking:

```
% Simple MPP "perturb and observe" tracking algorithm
% using Boost DC-DC input current Iref as the control variable
% Pold, Iref and Increment are initialized in
%InitializeMPPtrackIref.m
% Input: power P to be maximized
% Output: reference current
function y = MPPtrackIref(P)
global Pold;
global Iref;
global Increment;
IrefH = 5; % upper limit for the reference current
IrefL = 0; % lower limit for the reference current
DeltaI = 0.02; % reference current increment
if (P < Pold)
Increment = -Increment; % change direction if P decreased
end
% increment current reference
Iref=Iref+Increment*DeltaI;
% check for upper limit
if (Iref>IrefH)
Iref = IrefH;
end
% check for lower limit
if (Iref<IrefL)
Iref = IrefL;
End
% save power value
Pold = P;
% output current reference
y = Iref;
```

IV.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT) :

La figure (IV.17) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » :

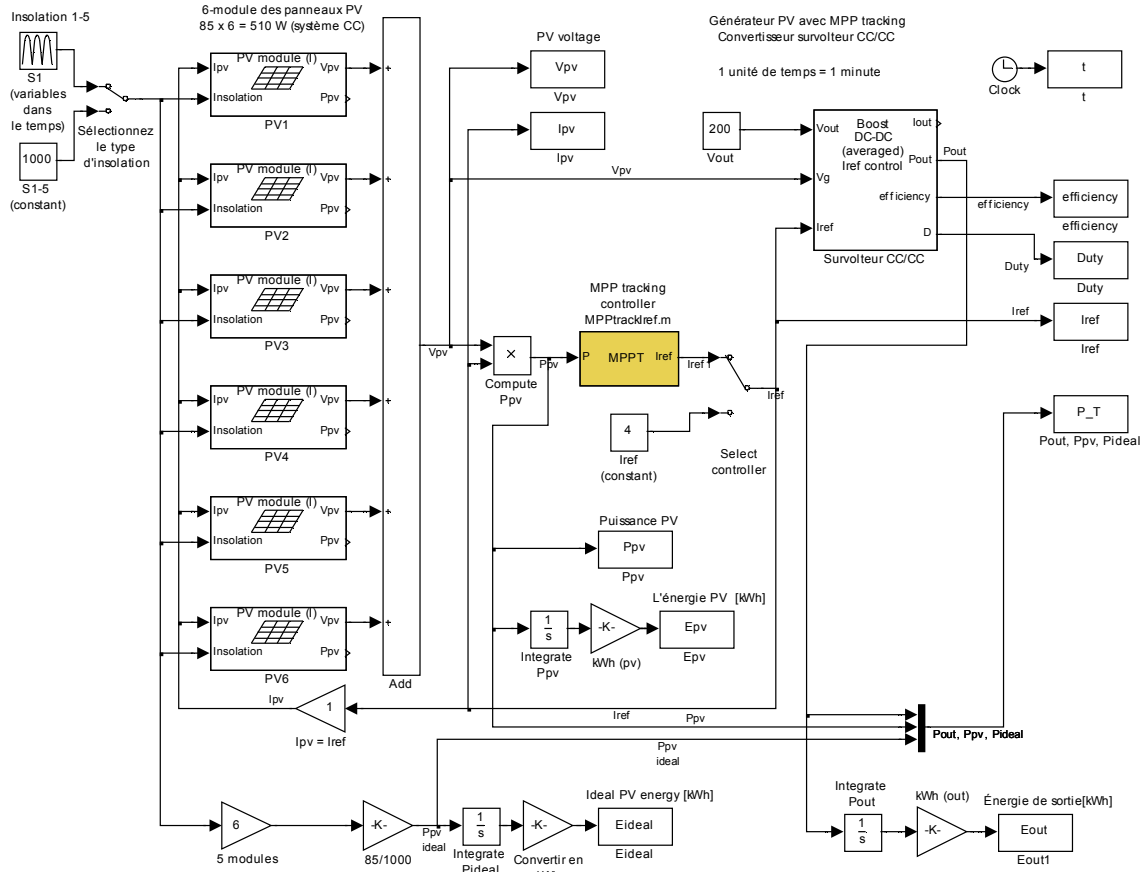


Figure IV.18 : Schéma matlab simulink d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Par rapport le convertisseur DC-DC (hacheur survolteur)

- Réglez le point de fonctionnement PV (V_{PV}, I_{PV}) pour un MPPT.
- renforcer efficacement V_{PV} à une plustension continue V_{dc} .

On prendre l'exemple des six modules 85W en série, en plein soleil, Pour ce la l'exemple de simulation donne :

- 6-module (85W chacune) Générateur PV en plein soleil (insolation = 1000 W/m²).

- Générateur PV fonctionne à MPP: $P_{PV} = 6 \times 85 \text{ W} = 510 \text{ W}$.

Des choix pour le convertisseur DC-DC les variables de contrôle suivant :

- le rapport cyclique α .
- Courant d'entrée de référence I_{ref} .
- tension d'entrée de référence V_{ref} .

➤ L'objectif de l'algorithme MPP tracking est contrôler les variable de sortie de GPV qui ce dernier fonctionne au point de puissance maximale.

Dans l'exemple présenté ici:

- On suppose que la tension de sortie $V_{out} - \text{Boost} = V_{dc}$ est constante.
- I_{ref} l'on utilise comme grandeur de réglage pour le convertisseur DC-DC.
- Un courant photovoltaïque suit idéalement le courant de référence qui entrée le convertisseur (DC-DC) actuelle: $I_{PV} = I_{ref}$.

IV.7.1 1^{er} teste de Simulation: (sans MPPT) :

Dans ce cas nous lancement le modèle de simulation mais sans intégrer le contrôleur MPP tracking . Le point de PPM dans la caractéristique (P-I) correspondre un courant I_{PV} optimale est égale à le courant de référence I_{ref} ($I_{ph_{optimale}} = I_{ref} = 4 \text{ [A]}$) ce courant on peut forcer le panneau photovoltaïque pour fonctionner dans le PPM.

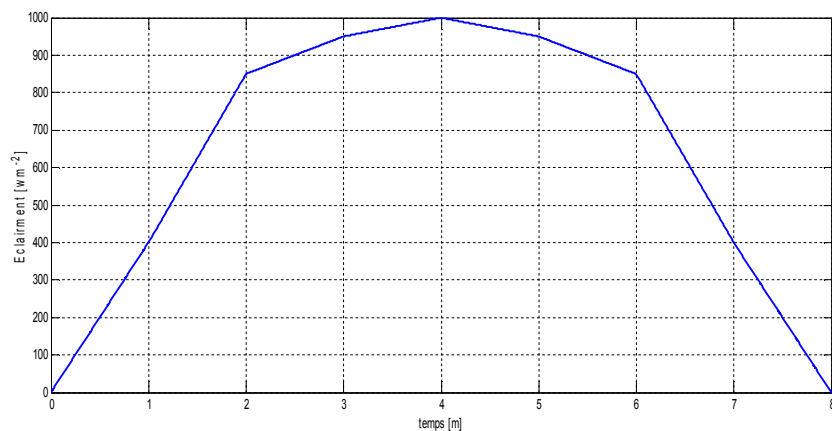


Figure IV.19 : L'ensoleillement en fonction du temps

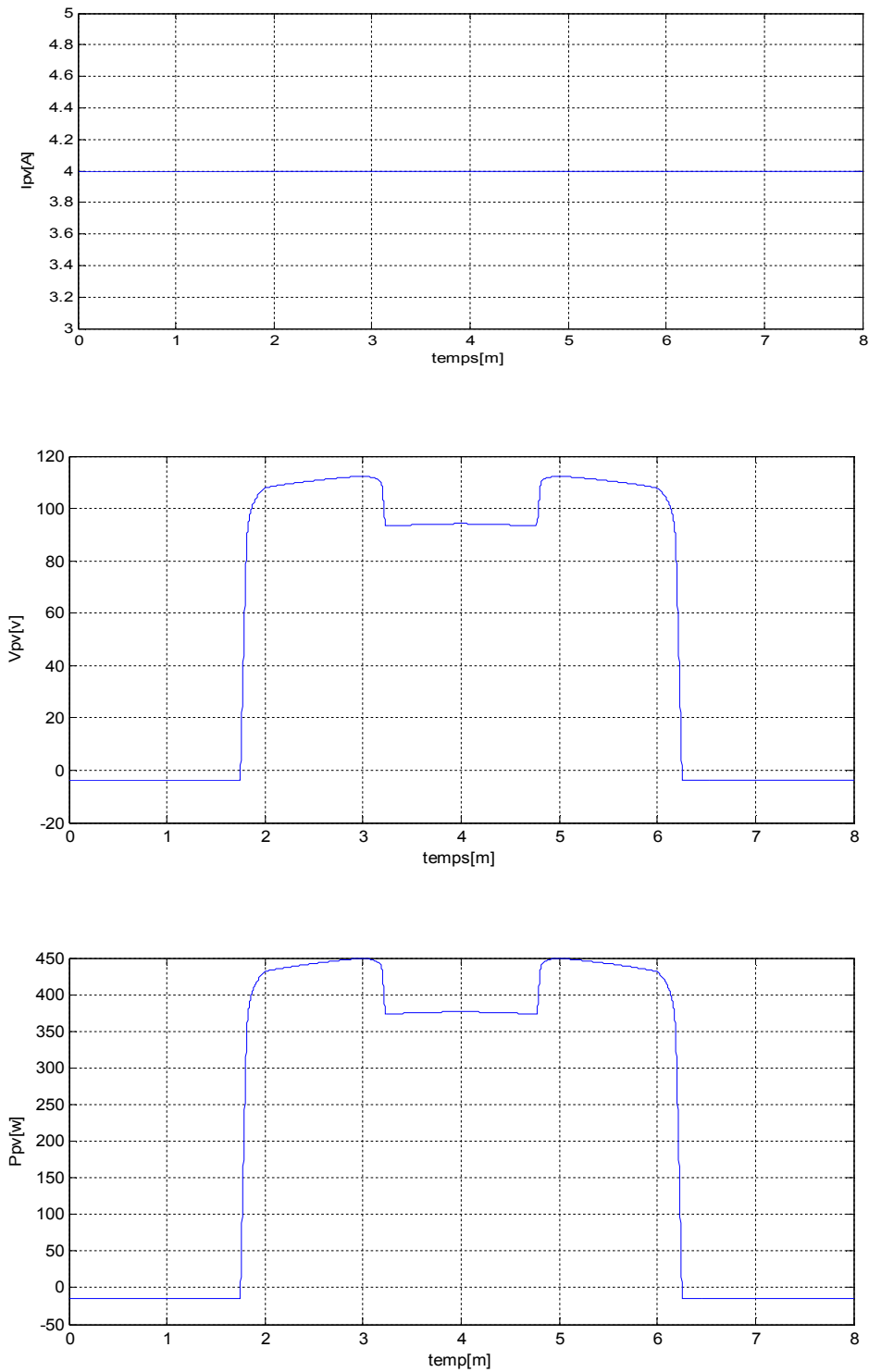


Figure IV.20 : Le courant ($I_{ref} = I_{ph}$), la tension et la puissance photovoltaïques en fonction de temps sans intégrer le contrôleur (MPPT-P&O) et pour Variation d'ensellement

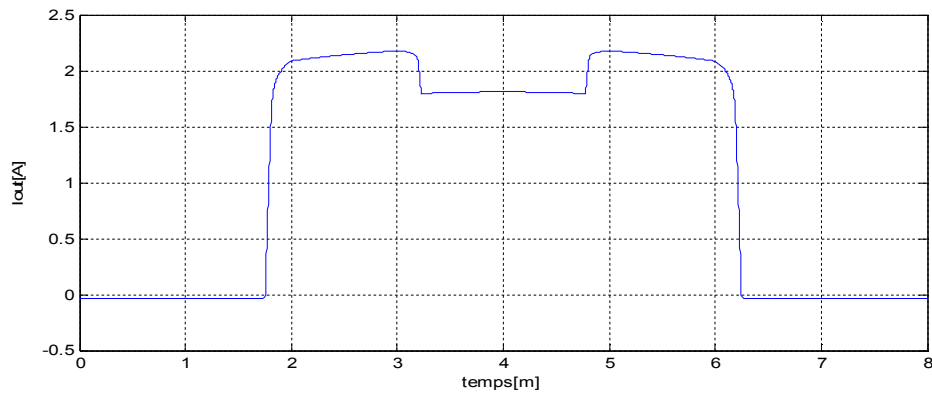


Figure IV.21 : Courant de sortie du convertisseur DC-DC (Hacheur) en fonction de temps

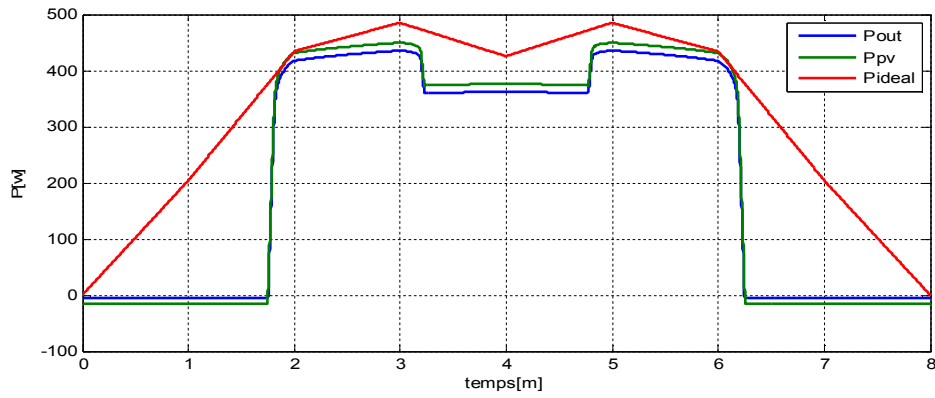


Figure IV.22 : Comparaison les puissances P_{out} , P_{pv} à $P_{ideal-pv}$

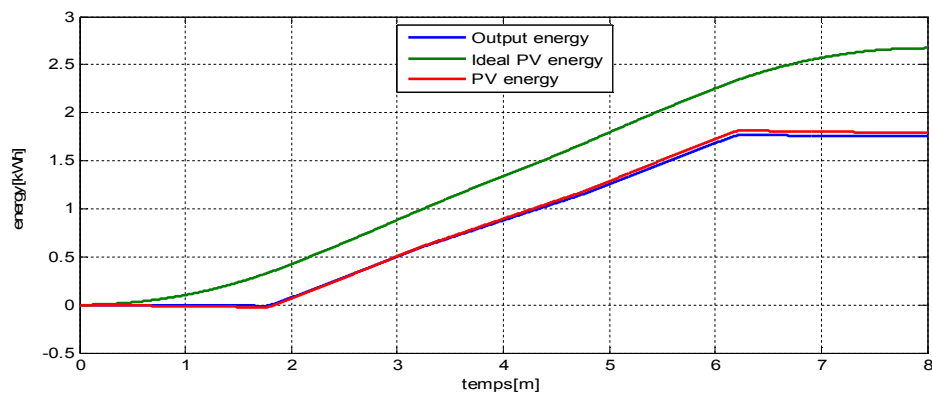


Figure IV.23 : Comparaison l'Energie E_{out} , E_{pv} à $E_{ideal-pv}$ en kilowattheure

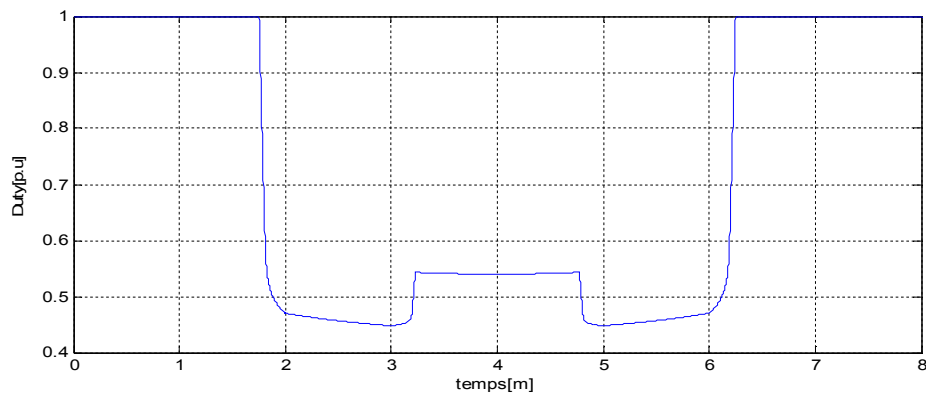


Figure IV.24 : Le rapport cyclique du hacheur survolteur en fonction de temps

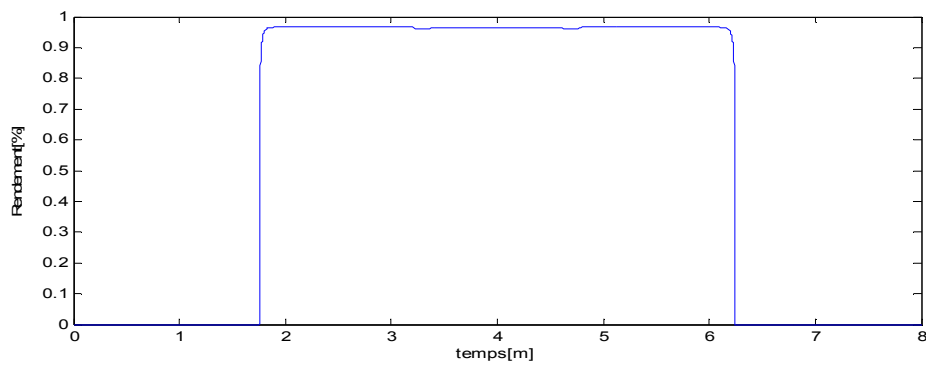


Figure IV.25 : Rendement de la convertisseur DC-DC en fonction de temps

IV.7.2 2^{ème} teste de Simulation: (avec MPPT) :

Nous avons vus dans ce section les opérations qui faire lorsque intégrer le controleur MPPT tracking (à base de la méthode Perturbé and Observé)

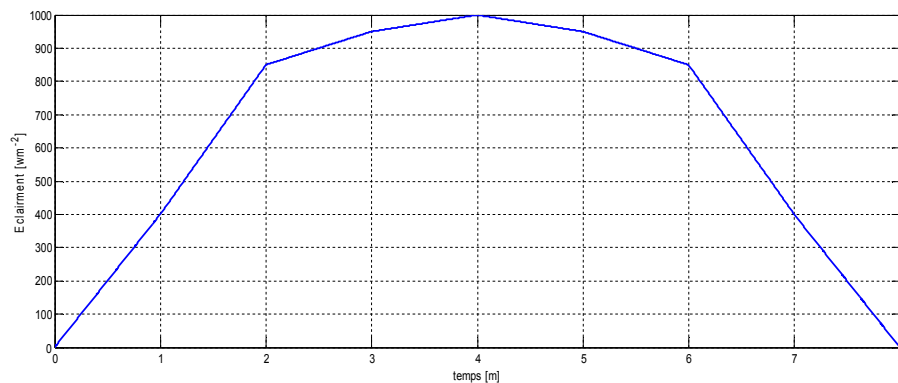


Figure IV.26 : L'ensoleillement en fonction du temps

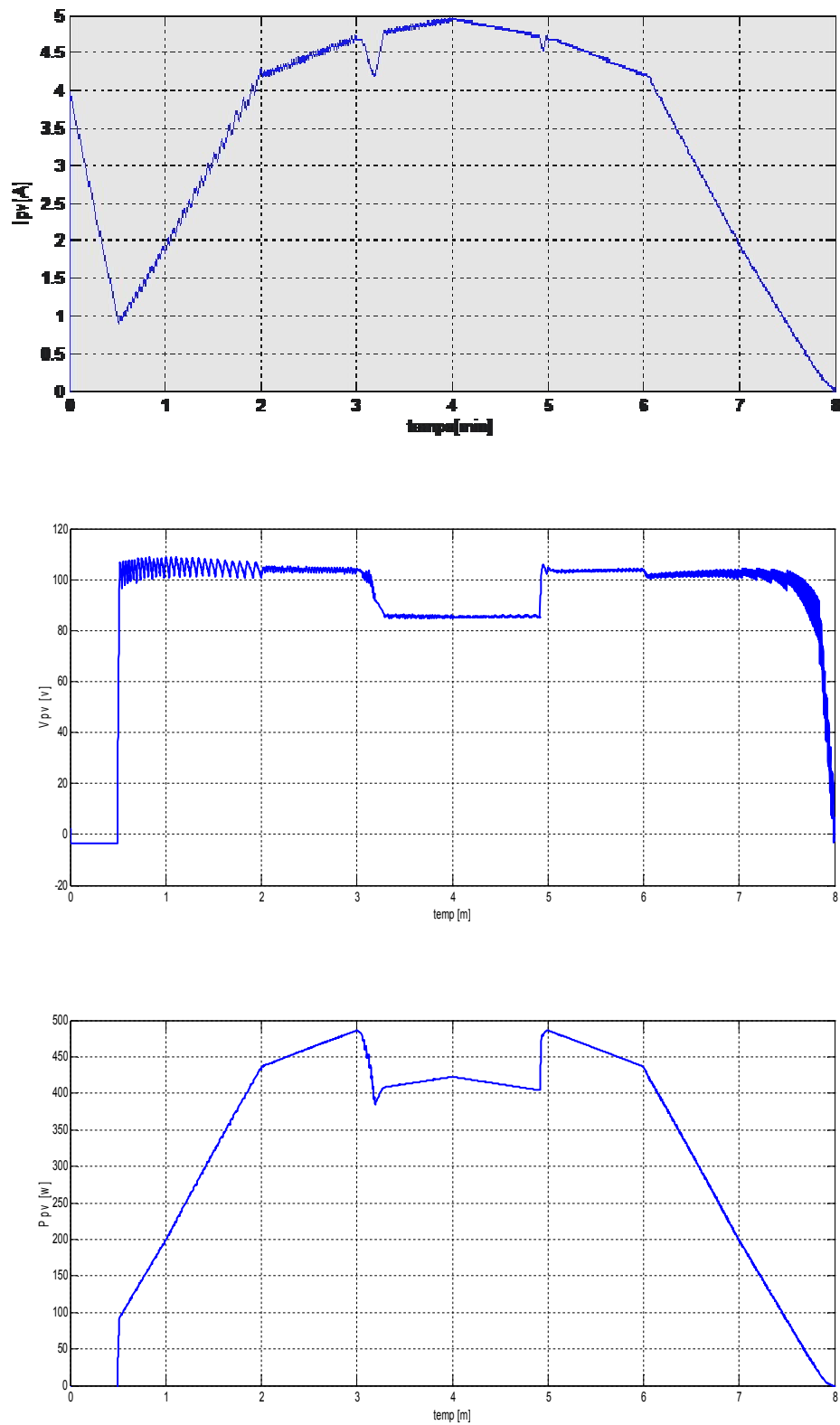


Figure IV.27 : Le courant($I_{ref}=I_{ph}$), la tension et la puissance photovoltaïques pour Variation d'ensellement en fonction de temps

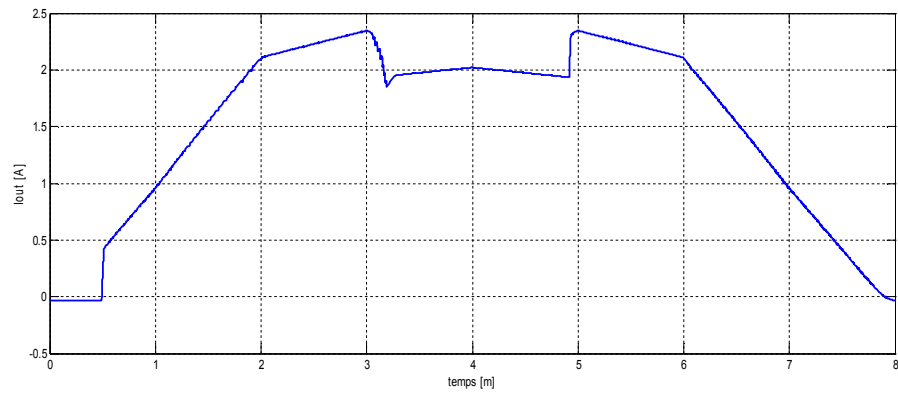


Figure IV.28 : Courant de sortie du convertisseur DC-DC (Boost)

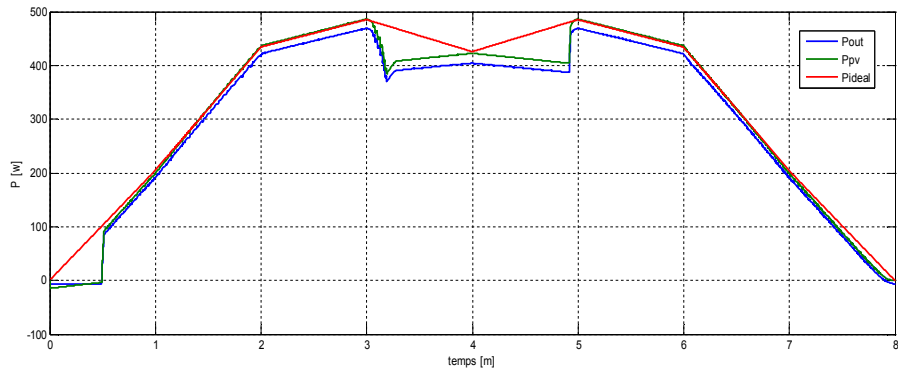


Figure IV.29 : Comparaison les puissance P_{out} , P_{PV} à $P_{idéal-pv}$

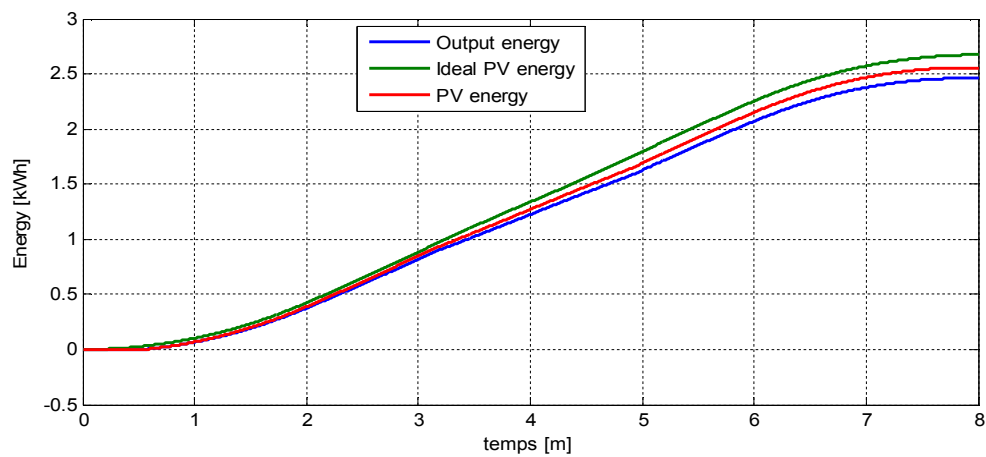


Figure IV.30 : Comparaison l'Energie E_{out} , E_{PV} à $E_{idéal-pv}$ en kilowattheure

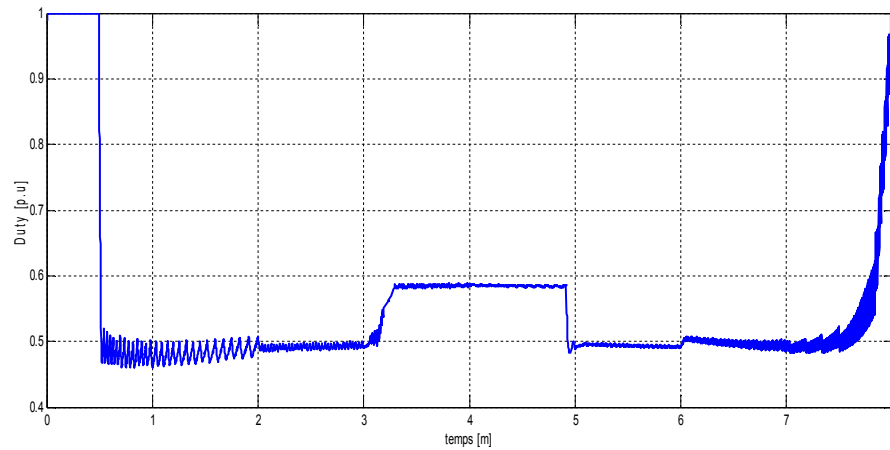


Figure IV.31 : Le rapport cyclique (*Dutysycle*) du hacheur survolteur en fonction de temps

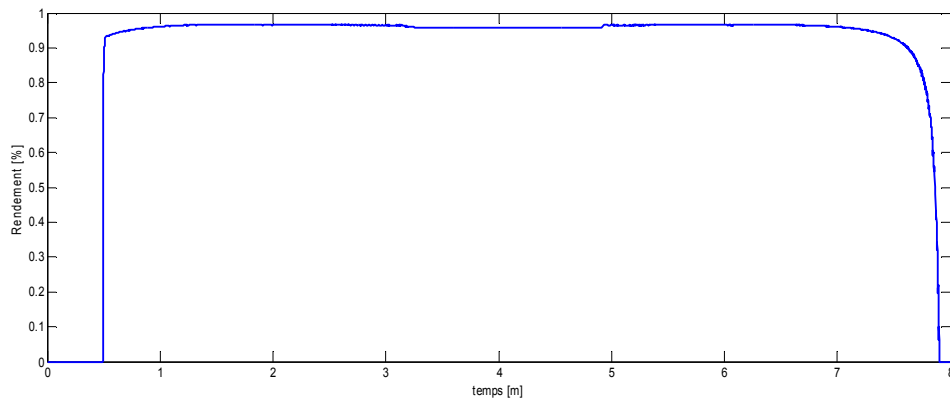


Figure IV.32 : Rendement de la hacheur (*boost*) en fonction de temps

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «perturbation et observation» représentent par les figures (IV.18) à (IV.31). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT «perturbation et observation» effectuent correctement leurs rôles.

L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

IV.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » est présentée.

Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement $1000\text{W}/\text{m}^2$ température 25°C .
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

CONCLUSION GÉNÉRALE

A la fin de ce travail on peut dire que notre contribution a été axée sur l'énergie solaire qui en plus d'être renouvelable est aussi d'une flexibilité utile, cette énergie qui est fournie par des générateurs photovoltaïque caractérisés par un point où la puissance est maximale.

Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques, un mécanisme de poursuite s'avère indispensable pour une efficacité meilleure du générateur.

A travers ce projet, la méthode MPPT(P&O) est proposée afin de maximiser le profit en termes d'énergie qui alimentant la charge ce qui signifie la minimisation des pertes d'énergie.

Pour avoir le meilleur transfert de puissance entre le générateur photovoltaïque 'GPV' et la charge, nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de conversion sous Matlab et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été conçu puis simulé. Il force le générateur GPV à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique.

A après les Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque pour différentes valeurs d'insolation et de température, ont été obtenus en simulant le contrôleur MPPT-PSO.

Alors, on peut dire que les résultats obtenus a partir de notre application pratique sont très satisfaisants.

Comme perspective nous proposons d'étudier un système de production d'énergie (solaire / éolien /diesel)

Références bibliographiques

- [1] **Yannick Veschetti**, " Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles Structures Photovoltaïque sur substrat de silicium mince". Thèse de Doctorat, Université Louis pastor, Strasbourg 2005.
- [2] **Alain Bilbao Learreta**, " Réalisation de commandes MPPT numériques", Diplôme ingénieur technique Industriel toulouse 2004
- [3] **Rezzoug Mouhamed Ridha** , " Etude et conception d'un positionneur automatique de panneau solaire Mémoire de Magister. Centre universitaire d'Oum El Bouaghi 2005.
- [4] **Mme Barkani Aicha**, " Simulation d'un système photovoltaïque à thyristor Couplage à un moteur à,Courant continu", Mémoire de fin d'étude ingénieur.encadré par: M^{me} F. Boulgamh, Centre universitaire d'Oum El Bouaghi 2001.
- [5] **Valérie Pommier, Marc Budinger, Gilles pérusot**, " Les énergies renouvelables étude et optimisation du fonctionnement d'un Système photovoltaïque" Toulouse 2005.
- [6] **A.Betka** "perspectives for the sake of photovoltaic puping development in the south"Thèse de doctora , universite de Batna
- [7] **H. Mehires et M.C. Sekal**, "Mis en oeuvre d'un ordinateur mono carte pour la caractérisation d'un générateur", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.
- [8] **S. Rodriguez**, "Réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur photovoltaïque à partir d'un girateur de puissance", Diplôme : Ingénieur Technique Industriel, Université ROVIRA I VIRGILI, Espagne Juin 2008.
- [9] **A. Tsamda et K. Mahmoud**, " Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques ", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.

- [10] **Z. Bendjellouli**, "Contribution à la modélisation d'une cellule", Mémoire de Magistère, Université de Bechar, 28 Juin 2009
- [11] **S. Ameziane**, "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien", Mémoire de Magistère, Université de Batna, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna 01 juillet 2009.
- [12] **M. Boudjema et N. Belhaouas**, "Commande d'une poursuite du point de puissance maximum MPPT par les Réseaux de Neurones et implémentation sur FPGA et DSP", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.
- [13] **G. Walker**, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model", Journal of Electrical & Electronics Engineering. Australia, IE Aust. Vol.21.No.1. 2001, PP.49-56.
- [14] **D. Bellala**, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna.
- [15] **M. Djarallah**, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna 16 janvier 2008.
- [16] **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'Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [17] **C. Cabal**, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse 15 Décembre 2008.
- [18] **M. Belhadj**, "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ", Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, 2007/2008.
- [19] **M. Dahbi** « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007

[20] **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'Ecole Normale Supérieure de Cachan

[21] **I.Vechiu**, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de Doctorat, Université de Havre, France 15 Décembre 2005.