

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En réseaux Electrique

Présenté par

REDOUANI SALAH

LAICHE MOHAMMED LAID

MAIZA MOHAMMED RABAH

Thème

**Implémentation de la technique de maximisation de
puissance pour contrôler le système photovoltaïque**

Soutenu le Juin /2023. Devant le jury composé de :

Dr :Gacem abdelmalek

Président

Dr :Tomi jafer

Examineur

Dr :MAAMIR Madiha

Encadreur

2023/2022

Remerciements

*nous voudrions exprimer nos profonde
reconnaissance et*

*nos sincères remerciements à toutes les personnes
qui ont contribué de près ou de loin à
l'avancement de notre travail de recherche.*

*Nous tenons à remercier profondément notre
directeur*

*de recherche, Dr. Madiha MAAMR , pour
la confiance qu'il a bien voulu nous accorder
en acceptant de diriger ce travail et pour nous
avoir guidé tout au long du mémoire pour ses
conseils, ses critiques et son attitude exemplaire
tout au long de la réalisation de ce travail de
recherche*

*Finalement, nous tenons à remercier tous les
membres de nos familles pour leur soutien et
leur aide . Nous leur serons reconnaissants
toute notre vie.*

ملخص :

الطاقة الشمسية هي مصدر مهم للطاقة المتجددة، ومع ذلك، فإن نقطة الاستطاعة القصوى مرتبطة بدرجة الحرارة ومستوى الإشعاع الضوئي. لذلك، من الضروري تتبع أقصى نقطة للطاقة الفعالة للتشغيل، ولهذا تم اقتراح طريقة التحكم في نقطة الطاقة القصوى (MPPT) باستخدام الطريقة الشهيرة (P&O) للحفاظ على أعلى مستوى من الطاقة المولدة من الألواح الشمسية. ولقد قمنا بتطبيق هذا البرنامج لتعقب أقصى نقطة للاستفادة الأمثل من الطاقة المولدة من الألواح الكهروضوئية تحت ظروف متغيرة مثل درجة الحرارة ومستوى الإشعاع الضوئي. وفي النهاية، توصلنا إلى أن النتائج تبين فعالية هذا النهج في إيجاد الحل الأمثل لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة تحت مختلف الظروف.

Résumé :

L'énergie solaire est une source importante d'énergie renouvelable, cependant, le point de puissance maximale dépend de la température et du niveau de rayonnement lumineux. Il est donc nécessaire de suivre le point de puissance maximale pour un fonctionnement efficace, c'est pourquoi la méthode de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) a été proposée, utilisant l'algorithme P&O (Perturb and Observe) pour maintenir le plus haut niveau d'énergie générée par les panneaux solaires. Nous avons appliqué ce programme pour suivre le point de puissance maximale afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dans des conditions variables telles que la température et le rayonnement lumineux. En conclusion, les résultats montrent l'efficacité de cette approche pour trouver la solution optimale afin d'obtenir la puissance maximale dans différentes conditions.

Abstract:

Solar energy is an important source of renewable energy. However, the maximum power point depends on temperature and the level of irradiance. Therefore, it is necessary to track the maximum power point for efficient operation. The MPPT (Maximum Power Point Tracking) control method using the P&O (Perturb and Observe) algorithm has been proposed to maintain the highest level of power generated by solar panels. We have applied this program to track the maximum power point for optimal utilization of energy produced by the photovolta

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1.Introduction :	3
I.2.Cellule photovoltaïque :	3
I.3.Principe de la conversion photovoltaïque :	4
I.3.1. Module photovoltaïque :	5
I.3.2. Générateur photovoltaïque :	5
I.3.3. Champ photovoltaïque :	5
I.4.Eléments constituant un système PV :	6
I.4.1.Notions fondamentales :	6
I.4.2.Paramètres d'un panneau photovoltaïque :	9
I.4.2.1.Caractéristique courant-tension $I(V)$:	9
I.4.2.2.Facteur de forme FF (Fill Factor) :	10
I.4.2.3.Le rendement énergétique :	11
I.5.Types d'installations photovoltaïques :	11
I.5.1 Systèmes PV autonomes :	11
I.5.2 .Systèmes PV connectés au réseau :	12
I.6.Différentes connexions des systèmes photovoltaïques :	12
I.7.Convertisseurs DC-DC ou hacheurs :	13
I.7.1 Hacheur Buck (série/abaisseur) :	14
I.7.2 Hacheur Boost (parallèle) :	15
I.7.3 Hacheur buck Boost (parallèle/élévateur):	15
I.8.Convertisseur DC-AC ou onduleurs :	16
I.9.Conclusion :	17

Chapitre II : Modélisation et commande MPPT de système photovoltaïque

II.1.Introduction :	19
II.2.Modélisation d'un panneau photovoltaïque :	19

II.2.1.Caractéristique I-V	21
II.2.2.Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV Influence De L'ensoleillement:.....	22
II.2.3.Influence de la température:	23
II.3.1.Modélisation des hacheurs :	25
II.3.2.Modèle de Convertisseur Boost :.....	26
II.3.3.Modélisation du circuit:	26
II.3.4.Représentation d'état :	26
II.3.5.Simulation:.....	28
II.3.6.Résultat de la simulation:.....	28
II.3.7.Modelé de Convertisseur Buck-Boost :	29
II.3.8.Modélisation du circuit:	29
II.3.9.Simulation d'un convertisseur BUCK-BOOST en Matlab:.....	30
II.3.10.Résultat de la simulation:	31
II.4.1.Commande MPPT :	32
II.4.2.Principe de la recherche de MPP :.....	33
II.4.3.Régulateurs MPPT:	33
II.4.4.Méthodes MPPT:	34
II.4.5.Les algorithmes de MPPT Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT	34
II.4.6.Méthode de perturbation et observation:	35
II.4.7.Résultat de simulation :.....	36
II.5.1. Conclusion :.....	38

ChapitreIII : Réalisation des systèmes de commande MPPT

III.1Introduction :.....	40
III.2 Réalisation du hacheur Buck-Boost :.....	40
III.2.1 Réalisation de circuit imprimé :	40
III.2.2 Soudure des composants électroniques :	41
III.3 Carte Arduino UNO :	42
III.4.Différents composants du système :	43
III.4.1 Module CEM 80M-36 :.....	43
III.4.2 Capteur de courant AC712 :.....	44
III.4.3 Capteur de tension.....	45

III.5. Montage du système complet :	46
III.5.1. Test et Résultat :	46
III.5.2. Test de l'hacheur buck-boost :	46
III.6.1. Résultats pratiques sans changement d'éclairement :	48
III.6.2. Résultats pratiques avec changement d'éclairement :	50
III.7. Conclusion :	52
Conclusion_générale.....	54
Bibliographie.....	56

LISTE DES FIGURES

Chapitre I	Page
<i>Fig (I. 1) : Cellule photovoltaïque</i>	<i>4</i>
<i>Fig (I. 2) : Schéma d'une cellule élémentaire</i>	<i>4</i>
<i>Fig (I. 3) : Champ photovoltaïque</i>	<i>6</i>
<i>Fig (I. 5): Association des cellules en parallèle.....</i>	<i>7</i>
<i>Fig (I.6) : Cellules à Pérovskite.....</i>	<i>9</i>
<i>Fig (I. 7): Caractéristiques électriques d'un PV.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig (I. 8) : Exemple d'un système PV autonome (éclairage public CDER).....</i>	<i>12</i>
<i>Fig (I. 9) : Connexion directe d'un panneau photovoltaïque</i>	<i>13</i>
<i>Fig (I. 10) : Connexion d'un panneau photovoltaïque via un étage d'adaptation d'impédance.....</i>	<i>13</i>
<i>Fig (I. 11): Schéma électrique du hacheur buck</i>	<i>14</i>
<i>Fig (I. 12): Schéma électrique du hacheur Boost.....</i>	<i>15</i>
<i>Fig (I. 13): Schéma électrique du hacheur buck-boost.....</i>	<i>16</i>
Chapitre II	
<i>Fig (II.1) : Circuit équivalent d'un panneau solaire.</i>	<i>19</i>
<i>Fig (II.2) : Simulation d'un panneau solaire avec MATLAB.</i>	<i>21</i>
<i>Fig (II.3) : Caractéristiques I-V du module photovoltaïque.</i>	<i>21</i>
<i>Fig (II.4) : Caractéristique I/V d'un panneau PV.</i>	<i>22</i>
<i>Fig (II. 5) : Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure (II.8) : Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température variable.....</i>	<i>25</i>
<i>Fig(II.9) : Circuit équivalent d'un hacheur BUCK</i>	<i>25</i>
<i>Fig (II.10) : Circuit équivalent d'un hacheur BOOST.</i>	<i>26</i>
<i>Fig(II.11) : Schéma de base d'un convertisseur Boost.</i>	<i>28</i>
<i>Fig(II.12): Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.7$.</i>	<i>29</i>
<i>Fig(II.13) : Schéma de Simulation convertisseur BUCK-BOOST.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig(II.14): Allure des tensions BOOST-BUCK Pour $\alpha= 0.3$ a, 0.8bet$0.5(c)$.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig(II.15) : System MPPT.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig (II.16) : Caractéristique aux bornes d'un panneau solaire- situation du Point de Puissance Maxima.</i>	<i>34</i>
<i>Fig(II.17):Algorithm MPPT perturbation and observation (P&O) [23] [24]</i>	<i>36</i>

Fig(II.18):Profile de l'éclairement.	37
Fig (II .19) (a,b,c): suivantes montrent les résultats de simulation de la technique P&O appliquée un générateur pour un éclairement fixe.	38
Fig(II .20) : Profile de l'éclairement.	38
Fig(II.21): Profile de puissance.....	39

Chapitre III

Fig(III-1) Circuit imprimé du hacheur réalisé	41
Figure(II-2) schema de l'hacheur buck boost	41
Fig(III-3) Carte Arduino UNO [29].....	43
Fig (III-4) Module CEM 80M-36.	44
Fig(III-5) Capteur de courant ACS712.	45
Fig (III-6) :Capteur de tension.	45
Fig (III-7) Système PV réalisé.	46
Fig (III-8) : Rapport cyclique avec $\alpha=0.4$	47
Fig (III-8) : Rapport cyclique avec $\alpha=0.7$	48
Fig (III.9) : puissance de panneau photovoltaïque.....	49
Fig(III.10).Courant de panneau photovoltaïque.....	49
Fig(III.11).Voltage de panneau photovoltaïque.....	49
Fig(III.12) :.Rapport cyclique de l'hacheur	50
Fig(III.13) puissance de panneau photovoltaïque	51
Figure (III.14).Courant de panneau photovoltaïque	51
Fig(III.15).Voltage de panneau photovoltaïque.....	51
Fig(III.16) :.Rapport cyclique de l'hacheur	52

Liste des tableaux

Tableau (I.1) Types des cellules solaires	6
Tableau (III.1) Différents composants du hacheur réalisé.....	42

Liste des symboles

GPV : générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum power point tracker.

DC-DC: Direct Current-Direct Current.

PV : Photovoltaïque.

I_C : conductance Incrémentale.

P&O : perturbation et observation.

PWM : Pulse with modulation.

FF : Facteur de forme.

I₀ : Courant de sortie [A].

I_d : Courant de la diode.

I_{ph} : le photo-courant.

V_{ph} : Tension de sortie de la cellule(V).

V₀ : Tension de sortie [V].

V_L : Tension aux bornes de l'inductance [V].

V_{OC} : La tension du circuit-ouvert.

R_{ph} : la résistance de photovoltaïque.

R_s : Résistance série.

I_g : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

I_{pv} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_d : Courant à travers la diode.

R_p : résistance parallèle.

R_s : résistance série.

I_s : courant de saturation.

α : rapport cyclique.

T : period de commutation.

TON : temps de conduction de l'interrupteur.

TOFF: temps de blocage de l'interrupteur.

V_s, V_0 : tension de sortie .

V_e : tension d'entrée.

V_d : tension aux bornes de la diode.

I_s : courant de sortie.

I_L : courant traversant l'inductance.

K, S : l'interrupteur.

R : résistance fictive englobant la partie électrique et mécanique du moteur.

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque sont devenues des sources très prometteuses dans les ressources énergétiques futures d'un pays, en raison tout d'abord de sa nature propre, mais également en raison de la diminution des réserves des ressources conventionnelles (pétrole, gaz, etc...), de la croissance démographique et économique de ce pays incitant à produire plus d'énergies électriques [3].

Plusieurs ressources d'énergie renouvelables ont été découvertes ces dernières années, notamment, l'énergie éolienne, hydraulique et l'énergie photovoltaïque, cette dernière est l'une des énergies les plus renouvelables dans le monde. [3],[4]

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).[5]

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque. Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O). Ainsi, dans ce projet, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT: 'perturbation et observation') assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque sous éclairage uniforme et non uniforme.

L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure compréhension des performances du convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lorsqu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur les générateurs photovoltaïques,
- Dans le deuxième chapitre, on a étudié quelques types des convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. on a décrit aussi la commande MPPT choisis pour commander notre convertisseur DC-DC.
- Dans le chapitre trois, nous avons présenté les différentes étapes et la méthodologie suivie pour réaliser notre prototype. on a aussi donné une étude approfondie sur les carte d'interface Arduino-uno, sa construction son environnement de programmation et son principe de fonctionnement afin de simplifier son utilisation.
- A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1.Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité. Elle est produite à partir de panneaux solaires composés de cellules photovoltaïques qui convertissent directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Cette technologie est de plus en plus utilisée dans le monde entier, notamment dans les régions où l'ensoleillement est important. Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque sont nombreux, notamment sa capacité à produire de l'électricité de manière propre et renouvelable, sans émissions de gaz à effet de serre ni pollution atmosphérique.

Ce chapitre va présenter notre recherche bibliographique concernant l'utilisation de cette énergie. Tout d'abord, nous expliquerons le principe de l'énergie photovoltaïque. Ensuite, nous découvrirons les notions importantes à connaître pour se familiariser avec cette énergie. Enfin, nous présenterons les éléments d'un système photovoltaïque et les différentes technologies utilisées.

I.2.Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium, qui a la propriété de produire une différence de potentiel électrique lorsqu'il est exposé à la lumière. [1].



Fig (I. 1) : Cellule photovoltaïque

I.3.Principe de la conversion photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque est le processus par lequel la lumière du soleil est convertie en électricité utilisable. Ce processus est basé sur l'effet photoélectrique, qui a été découvert par Albert Einstein en 1905.

Lorsque la lumière du soleil frappe une cellule photovoltaïque, elle est absorbée par des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Les photons de la lumière solaire excitent les électrons dans les atomes de ces matériaux semi-conducteurs, ce qui leur donne suffisamment d'énergie pour se libérer de leur orbite autour du noyau atomique. Ce processus crée des paires électron-trou dans la cellule, ce qui crée une différence de potentiel électrique entre les deux côtés de la cellule.

Cette différence de potentiel électrique est appelée tension, et elle peut être utilisée pour produire un courant électrique en connectant les deux côtés de la cellule à un circuit externe. Ce courant électrique peut ensuite être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

La tension générée par une cellule photovoltaïque peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [5].

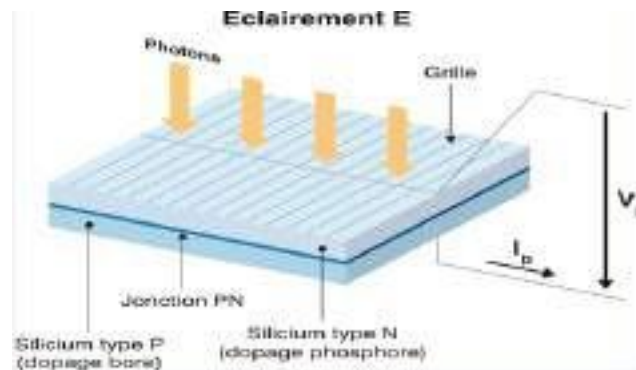


Fig (I. 2) : Schéma d'une cellule élémentaire

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées sur les deux couches du semi-conducteur, l'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [2].

I.3.1. Module photovoltaïque :

Le composant le plus important de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie. La figure (I.3) représente un module photovoltaïque.

Des modules de plus en plus puissants sont disponibles sur le marché, en particulier pour la connexion du réseau, mais il y'a tout de même une limite liée au poids et à la manipulation. [1]

I.3.2. Générateur photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [1] [2].

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure à l'un volt.

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées. [1]

I.3.3. Champ photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le module PV avec un angle d'inclinaison

spécifique. La figure (1.4) représente un champ photovoltaïque. [1]



Fig (I. 3) : Champ photovoltaïque

I.4.Eléments constituant un système PV :

I.4.1.Notions fondamentales :

- La puissance d'un panneau photovoltaïque est exprimée en Watt crête (Watt peak en anglais). Il s'agit de la puissance produite par un panneau qui reçoit une irradiation de 1000 Watts par m².
- L'association des cellules photovoltaïques en série permet d'augmenter la tension générée d'un module tout en conservant le même courant (figure I.4) ("Les caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques," 2021). Si l'association des cellules se fait en parallèle, les courants traversant chaque cellule s'additionnent et cela permet d'augmenter le courant résultant du module tout en conservant la même tension (figure I.5).

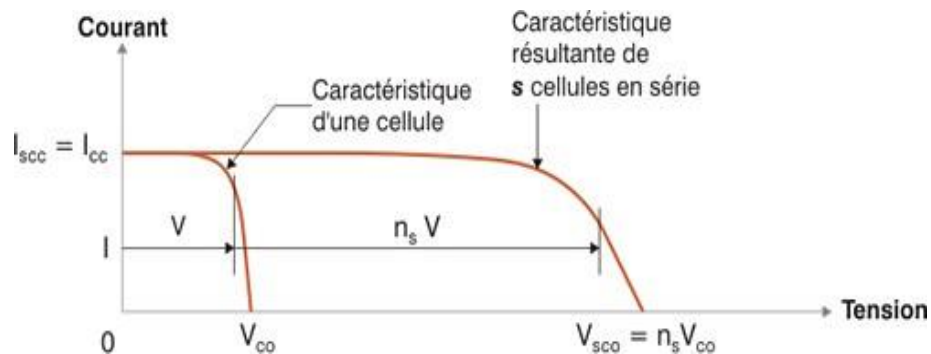


Fig (I. 4) : Association en série des cellules

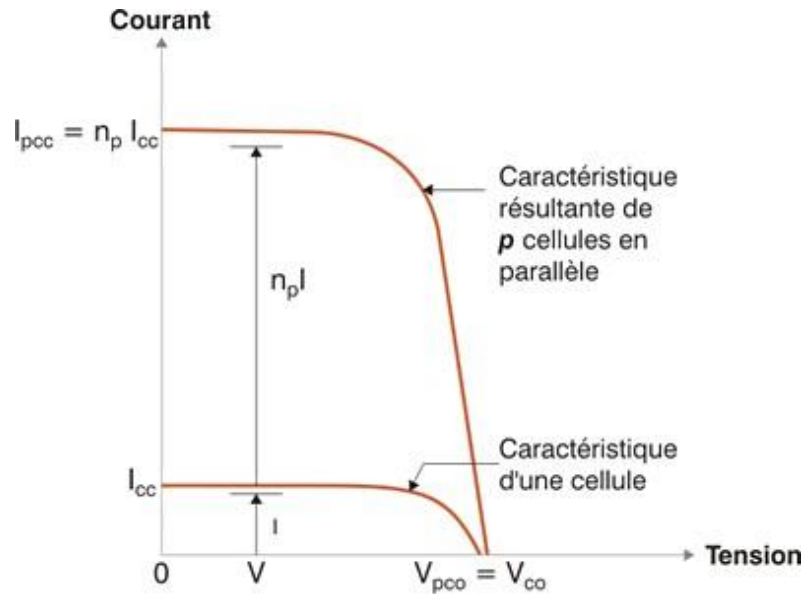


Fig (I. 5): Association des cellules en parallèle

Il existe aussi une connexion série/parallèle qui permet de profiter des avantages des deux types de connexion.

- Il est à noter que ce n'est pas parce qu'il fait chaud dehors que la production de l'énergie est importante, c'est la luminosité du soleil qui est transformée en électricité et non pas sa chaleur. La température des cellules photovoltaïques (qui varie globalement entre 20°C et 75°C lorsqu'elles sont en fonctionnement) est plus élevée que la température ambiante (qui va varier de -20°C à 40°C). La température idéale des cellules pour un rendement optimum est de 25°C.

Ce qui explique pourquoi que la température de la cellule est plus importante que la température ambiante c'est le fait qu'une partie du rayonnement absorbée se dissipe sous forme de chaleur.

- Le rendement d'un panneau solaire dépend fortement de la technologie utilisée. La grande majorité des panneaux photovoltaïques qui existent sur le marché sont à base de silicium. Nous citons dans le tableau ci-dessous les 3 types les plus répandus :

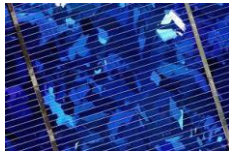
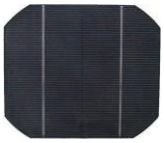
Type de cellule	Rendement	Avantages	Inconvénients
Monocristalline 	de 12 à 18%	Meilleur rendement	coût de production élevé
Polycrystalline 	de 11% à 15%	Bon rendement	coût de production élevé
Amorphe 	de 5% à 8%	faible coût	Très faible rendement

Tableau (I.1): Types des cellules solaires

Effectivement, le rendement est un facteur important qui peut freiner le déploiement du photovoltaïque. Le rendement d'une cellule photovoltaïque est la mesure de la quantité d'énergie lumineuse qui est convertie en électricité, et il dépend du matériau semi-conducteur utilisé, de la qualité de fabrication de la cellule, ainsi que des conditions d'utilisation telles que la température et l'intensité lumineuse.

Les cellules photovoltaïques les plus couramment utilisées, basées sur le silicium cristallin, ont un rendement typique de 15-20%. Bien que cela soit suffisant pour de nombreuses applications, cela signifie que plus de la moitié de l'énergie solaire incidente n'est pas convertie en électricité.

Cependant, il y a des efforts constants pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques en utilisant de nouveaux matériaux semi-conducteurs tels que la pérovskite ou en améliorant la conception et la fabrication des cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques à haut rendement sont actuellement en cours de développement et ont atteint des

rendements de plus de 40% en laboratoire. [9]

À l'issue de ce processus on obtient un module solaire très flexible et quasiment transparent (figure 1.6). Cette technique autorise un rendement actuel de 20%. Un autre point positif est que ce module revient beaucoup moins cher à produire que des modules à base de Silicium.

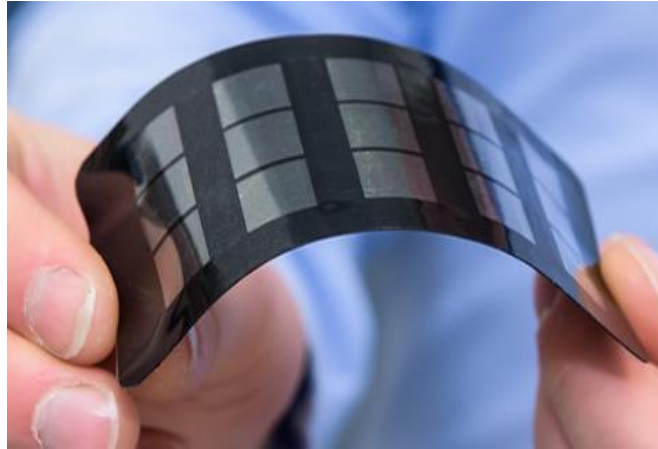


Fig (I.6) : Cellules à Pérovskite

I.4.2.Paramètres d'un panneau photovoltaïque :

I.4.2.1.Caractéristique courant-tension $I(V)$:

La caractéristique courant-tension ($I-V$) est une mesure de la relation entre le courant électrique et la tension d'un panneau photovoltaïque. Elle indique la quantité de courant électrique que le panneau peut produire à une tension donnée, ou la quantité de tension que le panneau peut produire à un courant donné.

La courbe $I-V$ d'un panneau photovoltaïque peut être utilisée pour déterminer le point de puissance maximale (PPM) du panneau. Le point de puissance maximale est le point où la production d'électricité est maximale pour un certain niveau d'ensoleillement et de température. Les panneaux solaires sont généralement conçus pour fonctionner à leur PPM pour une efficacité maximale. [10]

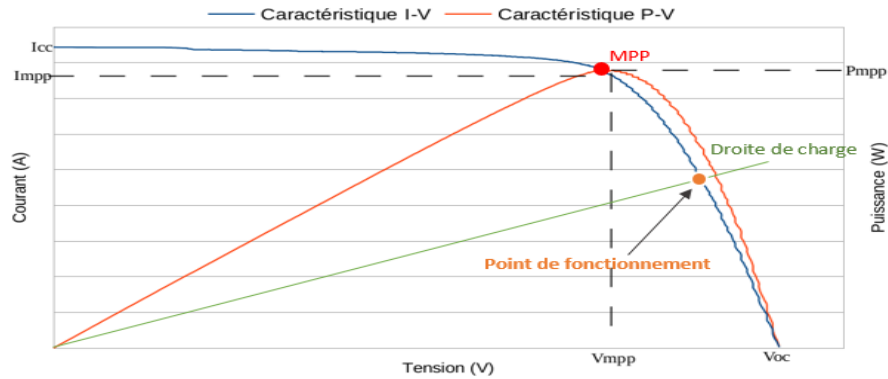


Fig (I. 7): Caractéristiques électriques d'un PV

La courbe (I-V) peut également être utilisée pour déterminer les performances du panneau photovoltaïque dans différentes conditions d'ensoleillement, de température et de charge. Les variations de température et d'ensoleillement peuvent modifier la courbe (I-V) et affecter la production d'électricité.

Il est important de noter que la caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque peut varier en fonction de la qualité de fabrication de la cellule, de l'efficacité de l'onduleur et de la qualité de l'installation du système. Il est donc important de choisir un panneau de qualité supérieure et de faire installer le système par un professionnel pour garantir une production d'électricité optimale.

I.4.2.2. Facteur de forme FF (Fill Factor) :

C'est le rapport entre la puissance maximale P_{max} fournie par le module PV et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc} :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{oc}} \quad (I.1)$$

I.4.2.3. Le rendement énergétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale P_{max} fournie par le module et la

puissance solaire incidente. Il est donné par la relation suivante :

$$n = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{P_{max}}{G \cdot A} \quad (I.2)$$

Avec : G : éclairement (W/m²) ; A : surface de la cellule (m²)

I.5.Types d'installations photovoltaïques :

I.5.1 Systèmes PV autonomes :

Le but de cette installation est d'assurer l'énergie demandée par la charge en tout temps. Elle comporte les éléments suivants : un ou plusieurs PV, une batterie de stockage et son contrôleur de charge et un onduleur autonome.

Ce système est utilisé pour les installations qui ne sont pas connectées au réseau, citons par exemple : les sites isolés (îles, en montagnes, désert), les éclairages publics ...[4]



Fig (I. 8) : Exemple d'un système PV autonome (éclairage public CDER)

I.5.2 .Systèmes PV connectés au réseau :

Un système PV connecté au réseau est un système photovoltaïque qui est connecté au réseau électrique public. Ce type de système est également connu sous le nom de système PV interconnecté.

Le fonctionnement d'un système PV connecté au réseau est relativement simple. Les

panneaux solaires captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité. Cette électricité est ensuite envoyée à un onduleur, qui convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif, qui est le type d'électricité utilisé par les appareils électriques.

I.6. Différentes connexions des systèmes photovoltaïques :

La connexion directe d'un panneau photovoltaïque à une charge est le principe de fonctionnement le moins cher, dans la mesure où la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue. L'inconvénient majeur de cette connexion est la dépendance entre la puissance fournie par le générateur et la charge. [5]

En effet, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du générateur photovoltaïque et celle de la charge [6]. Les panneaux solaires de première génération étaient dimensionnés pour que leurs points de puissance maximale correspondent à la tension nominale de batterie. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit à effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge.

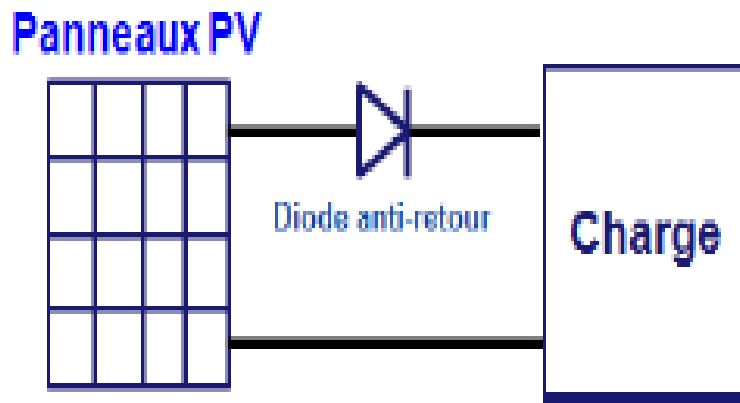


Fig (I. 9) : Connexion directe d'un panneau photovoltaïque

Les caractéristiques non-linéaires du module et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'ensoleillement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un dispositif d'adaptation pour optimiser la production d'énergie à chaque instant est ainsi nécessaire. Celui-ci peut être un convertisseur élévateur (boost), un convertisseur abaisseur (buck) ou un convertisseur élévateur/abaisseur (buck-boost) [6]

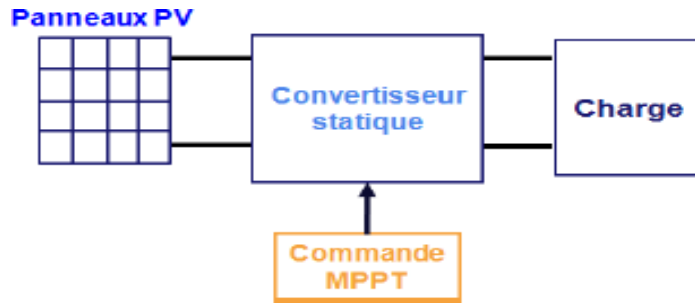


Fig (I. 10) : Connexion d'un panneau photovoltaïque via un étage d'adaptation d'impédance

Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure (I.10), 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.

I.7. Convertisseurs DC-DC ou hacheurs :

Les convertisseurs DC-DC, également appelés hacheurs, sont des dispositifs électroniques utilisés pour convertir une tension continue (DC) d'un niveau à un autre. Dans le contexte de l'énergie solaire photovoltaïque, les hacheurs sont souvent utilisés pour ajuster la tension produite par les panneaux solaires pour correspondre aux exigences du système. [11]

L'utilisation des hacheurs peut améliorer l'efficacité de l'ensemble du système solaire photovoltaïque en permettant aux panneaux solaires de fonctionner à leur point de puissance maximale (PPM) sous différentes conditions d'ensoleillement et de température. Les hacheurs permettent également de convertir la tension produite par les panneaux solaires en tension appropriée pour le système de stockage d'énergie ou pour l'alimentation du réseau électrique.

Pour les applications photovoltaïques, on distingue 3 types de convertisseurs non-isolés les plus répandus :

- Hacheur abaisseur (ou buck),
- Hacheur élévateur (ou boost),
- Hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

Le convertisseur est choisi en fonction de la charge à alimenter.

I.7.1 Hacheur Buck (série/abaisseur) :

Le hacheur Buck est un convertisseur de puissance électronique utilisé pour abaisser la tension continue (DC) d'une source d'alimentation. Il est également connu sous le nom de convertisseur abaisseur ou convertisseur en série.

Cet hacheur commande le débit d'une source de tension dans une charge de courant [11] Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. [12]

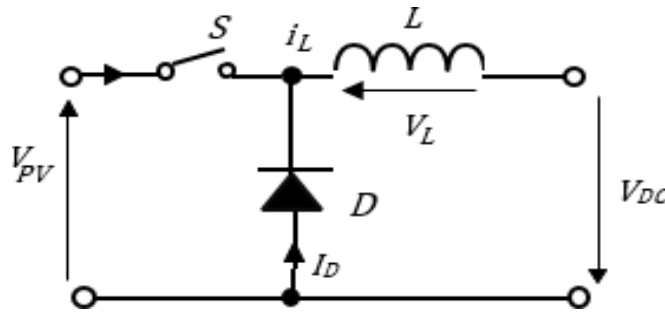


Fig (I. 11): Schéma électrique du hacheur buck

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes :

Lors de la première, on ferme l'interrupteur et la diode, polarisée en inverse, est bloquée.

La source V_{PV} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 (aussi appelé rapport cyclique).

Lors de la seconde, on ouvre l'interrupteur. La diode devient passante car l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D . Cette phase dure de αT à T .

La relation entre la tension d'entrée et celle de sortie est la suivante :

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha} v_{DC} dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha} V_{PV} dt = \alpha V_{PV} \quad (I.3)$$

A pertes minimales on a :

$$P_{PV} = P_{DC} \leftrightarrow V_{PV}I_{PV} = V_{DC}I_{DC} \leftrightarrow I_{PV} = \frac{V_{DC}}{V_{PV}}I_{DC} \leftrightarrow I_{PV} = aI_{DC} \leftrightarrow a = \frac{V_{DC}}{V_{PV}} = \frac{I_{PV}}{I_{DC}} \quad (I.4)$$

I.7.2 Hacheur Boost (parallèle) :

Ce convertisseur statique permet d'avoir une tension continue variable supérieure ou inférieure à la tension d'entrée qui est fixe.

Lors de la première phase de conduction, de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé. La diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

Lors de la seconde phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

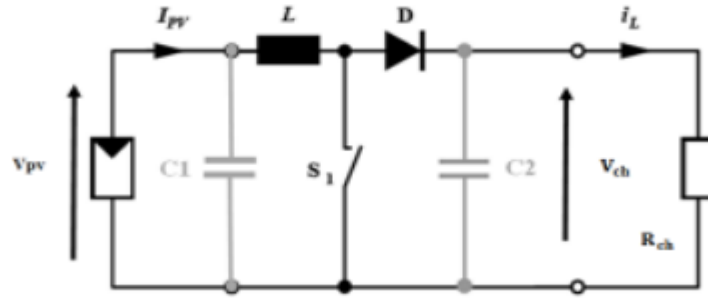


Fig (I. 12): Schéma électrique du hacheur Boost

I.7.3 Hacheur buck Boost (parallèle/élevateur):

En conduction continue et sachant que la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, on a :

$$V_{pv} = a T = V_{dc}(1 - a)T \quad (I.5)$$

Donc :

$$V_{DC} = \frac{a}{1 - a} V_{PV} \quad (I.6)$$

Suivant la valeur du rapport cyclique α , la tension moyenne de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée :

- lorsque $\alpha > 0.5$, le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost (élevateur).

- Lorsque $\alpha < 0.5$, le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck (abaisseur).

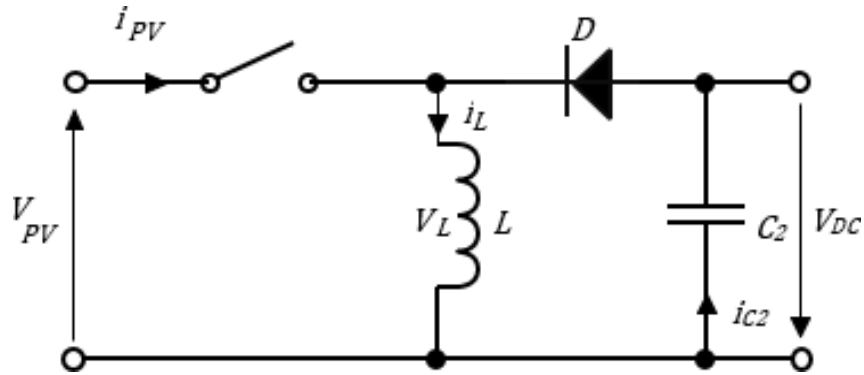


Fig (I. 13): Schéma électrique du hacheur buck-boost

I.8. Convertisseur DC-AC ou onduleurs :

Un convertisseur DC-AC, également appelé onduleur, est un dispositif électronique qui convertit une source de courant continu (DC) en une source de courant alternatif (AC) utilisable pour alimenter des charges AC telles que des équipements électroménagers, des outils électriques et des appareils électroniques.

Les onduleurs sont souvent utilisés dans les systèmes d'énergie solaire ou éolienne pour convertir l'énergie DC produite par les panneaux solaires ou les éoliennes en AC pour alimenter les équipements électriques domestiques ou les grilles de distribution d'énergie. Ils sont également utilisés dans les véhicules électriques pour convertir la tension de la batterie en AC pour alimenter le moteur électrique.

Il existe différents types d'onduleurs, tels que les onduleurs à onde sinusoïdale, les onduleurs à onde carrée et les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les onduleurs à onde sinusoïdale produisent une onde sinusoïdale de sortie de qualité supérieure, ce qui les rend plus adaptés aux applications sensibles à la qualité de l'énergie, tandis que les onduleurs à onde carrée ou PWM sont moins chers mais peuvent générer des interférences électromagnétiques qui peuvent affecter les équipements électroniques sensibles. [13]

I.9. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les notions élémentaires à connaître sur l'énergie solaire photovoltaïque. De ce fait, nous avons constaté les avantages techniques qu'offre cette énergie ainsi que ses limites.

Dans le prochain chapitre, une simulation d'un système photovoltaïque sera traitée à l'aide de l'interface graphique MATLAB/GUI pour essayer de comprendre les phénomènes qui s'y produisent et qui sont à l'origine de l'utilisation de cette énergie.

Chapitre II

Modélisation et commande MPPT de système photovoltaïque

II.1.Introduction :

On a vu dans le chapitre précédent une généralité sur le système photovoltaïque. Ainsi on a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous présenterons la modélisation et la simulation de système photovoltaïque élément par élément par partie et en fonctionnement avec l'ensemble du système. En début, on réalisera un modèle représentant la caractéristique de la cellule PV au moyen des équations du circuit réel. On obtiendra par ce programme la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans des plusieurs conditions en variant la température et l'éclairement. Après on abordera la simulation des convertisseurs DC/DC élévateur (Hacheur parallèle) et élévateur-abaisseur (hacheur buck-boost), et on a modélisera ses commande (MPPT) qui réalise la Recherche de Point de Puissance Maximale.

II.2.Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant:

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_g) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s).

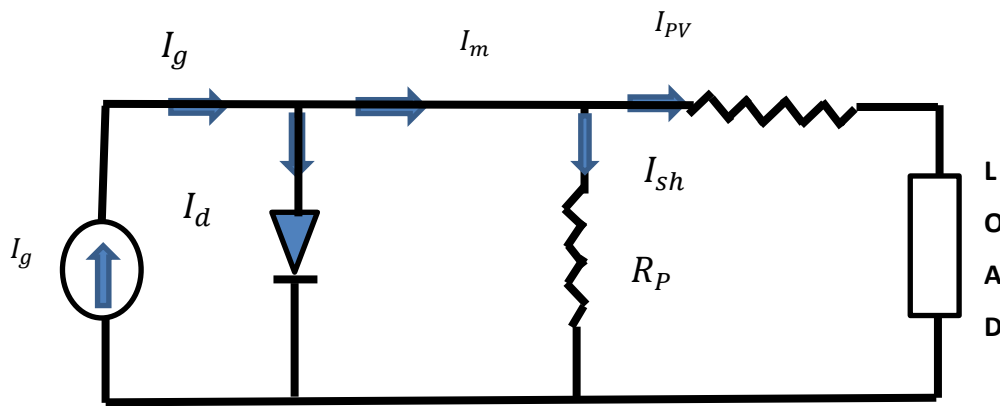


Fig (II.1) : Circuit équivalent d'un panneau solaire.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est

Donné par :

$$I_{PV} = I_m - I_{sh} \left(\exp \left(\frac{V + I_{PV} R_s}{V_t n} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I_{PV} R_s}{R_p} \right) \quad (2.1)$$

La forme du courant pv du générateur est régie par les équations suivantes :

$$I_{PV} = I_m - I_{sh} \quad (2.2)$$

I_{sh} : le courant traversant la résistance shunt donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I_{PV} R_S}{R_P} \quad (2.3)$$

$$I_m = I_g - I_d \quad (2.4)$$

I_g : est le courant PV généré proportionnel à l'ensoleillement donné par :

$$I_g = (I_{g,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_N} \quad (2.5)$$

I_d : est le courant de diode donné par :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I_{PV} R_S}{V_{tn}} \right) - 1 \right) n \quad (2.6)$$

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode donné par :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{oc,n} + K_V T \Delta}{a V_t} \right) - 1} \quad (2.7)$$

V_t est la tension équivalente à la température donnée par :

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (2.8)$$

I_g : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

I_{pv} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_d : Courant à travers la diode.

R_P : résistance parallèle.

R_S : résistance série.

I_S : courant de saturation.

Après avoir présenté l'équation actuelle du panneau solaire et l'avoir expliquée, nous passons à sa simulation à l'aide du programme MATLAB pour étudier ses caractéristiques I-V et P-V sous des températures changeantes et leur influence.

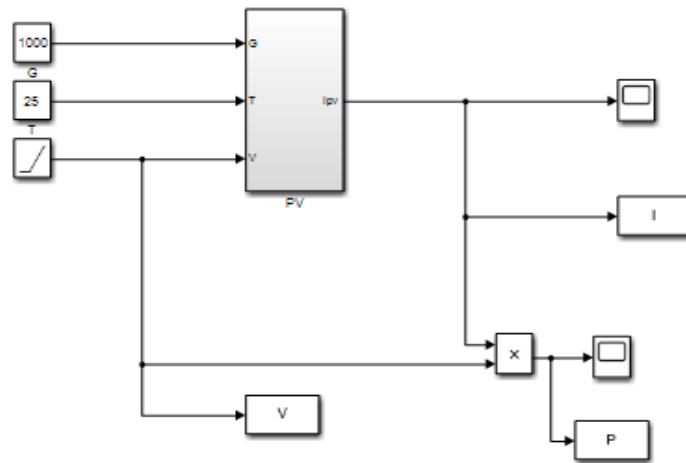


Fig (II.2) : Simulation d'un panneau solaire avec MATLAB.

II.2.1.Caractéristique I-V :

Les figures suivant présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de 1000W/m2 et une température de 25°C.

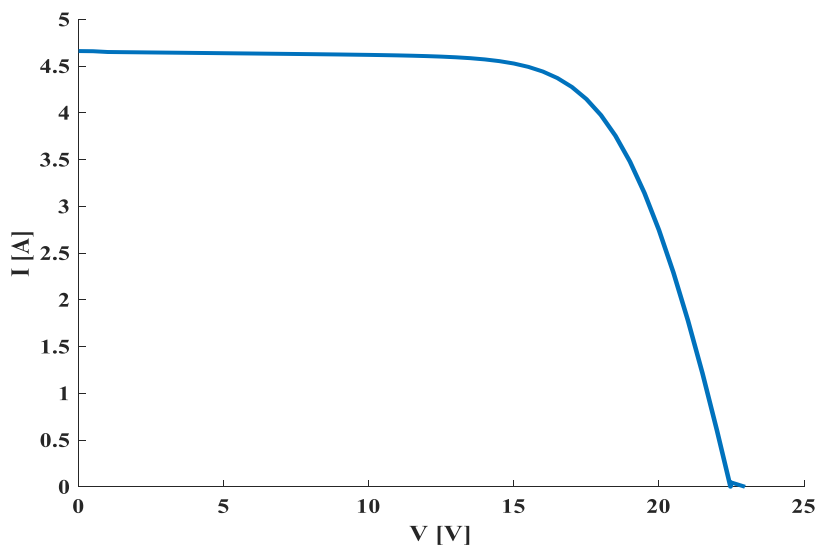


Fig (II.3) : Caractéristiques I-V du module photovoltaïque.

Les figures suivant présentent les Caractéristique p-v d'un générateur PV pour un rayonnement constant de 1000W/m2 et une température de 25°C.

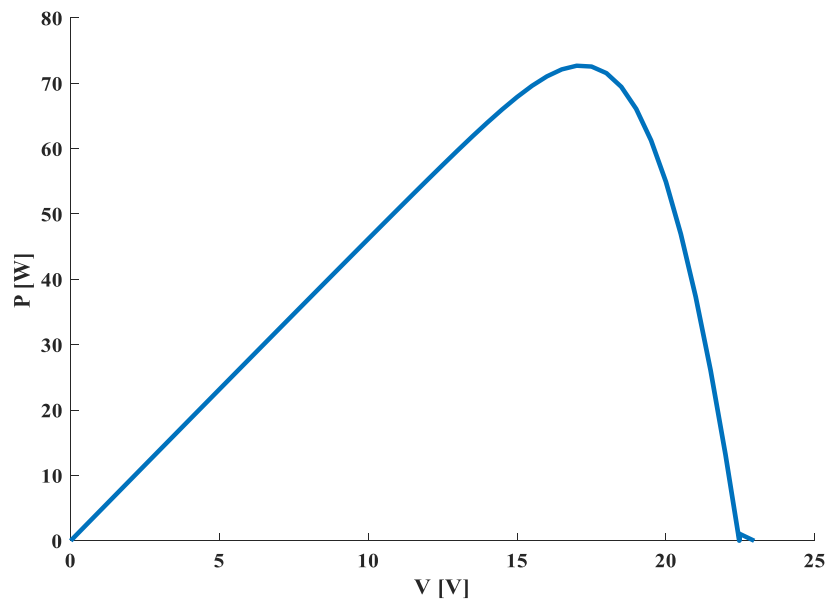


Fig (II.4) : Caractéristique I/V d'un panneau PV.

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de $1\,000\text{ W/m}^2$, température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale) [14].

II .2.2.Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV Influence De L'ensoleillement:

Les figures 1 et 2 précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante Il est clair que la valeur du courant de courtcircuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert Peu de changements, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

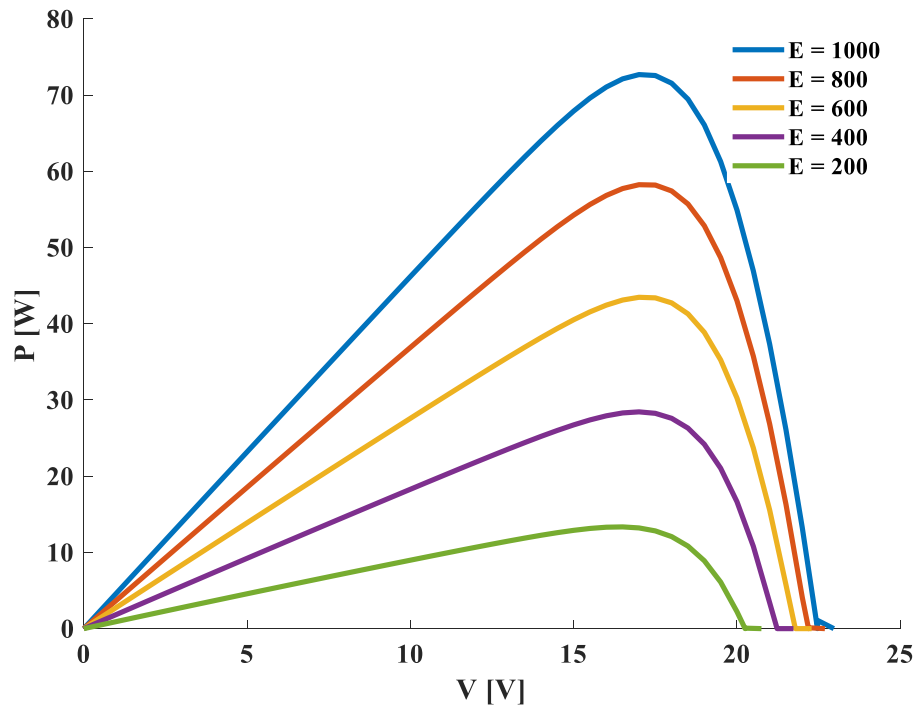
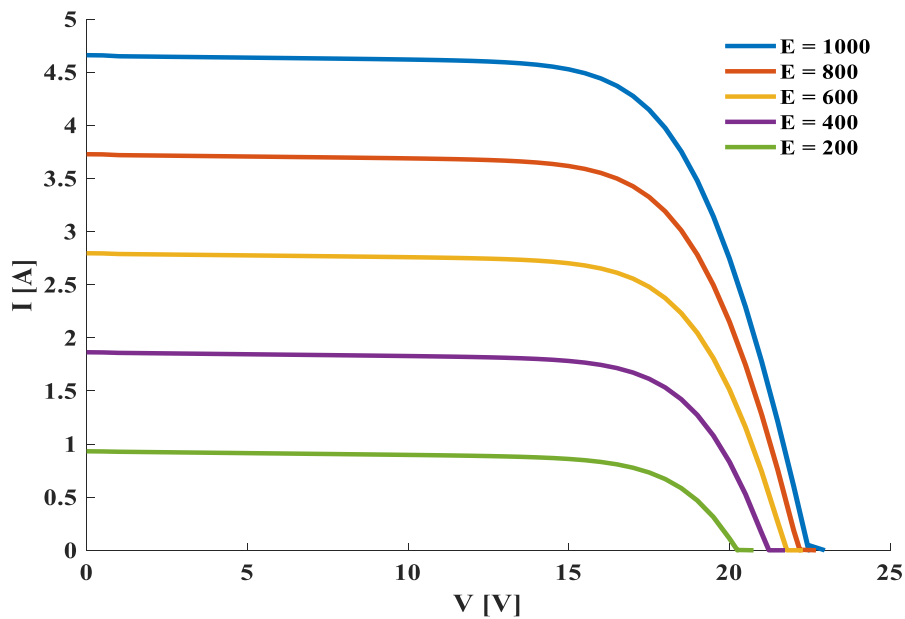


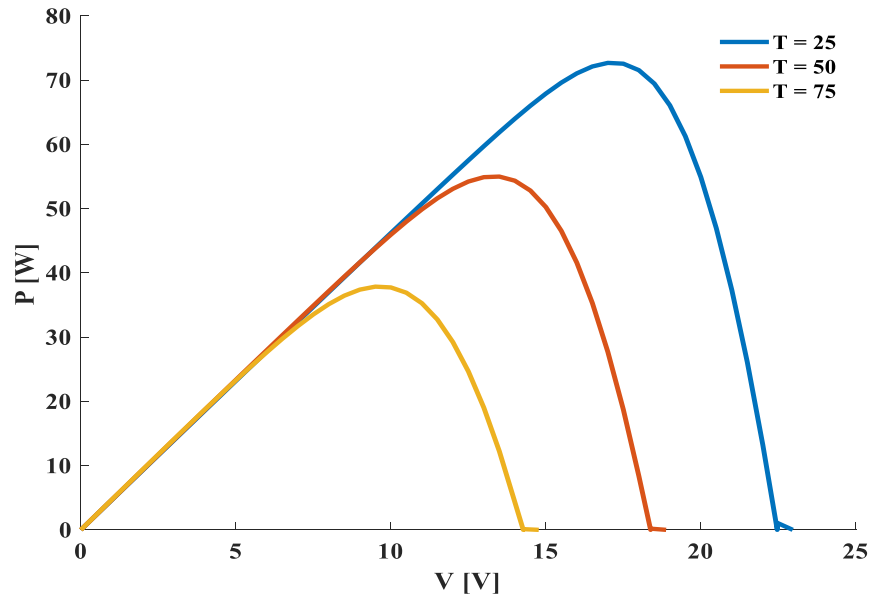
Fig (II. 5) : Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.



Fig(II.6) : Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

II.2.3. Influence de la température:

Les figures 1 et 2 précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante .



Fig(II.7) Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000 W/m^2 et une température variable .

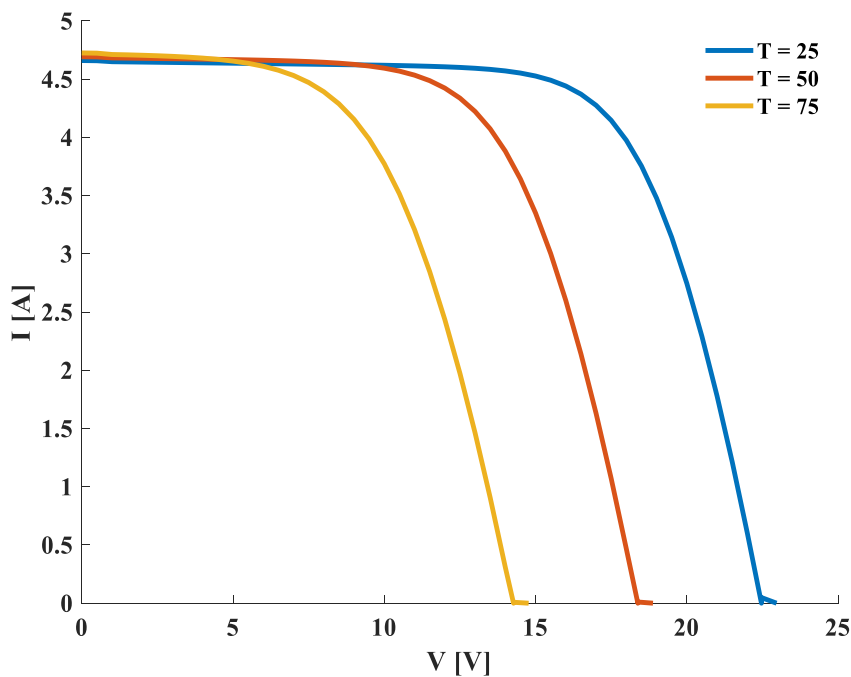


Figure (II.8) : Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement constant de 1000 W/m^2 et une température variable.

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

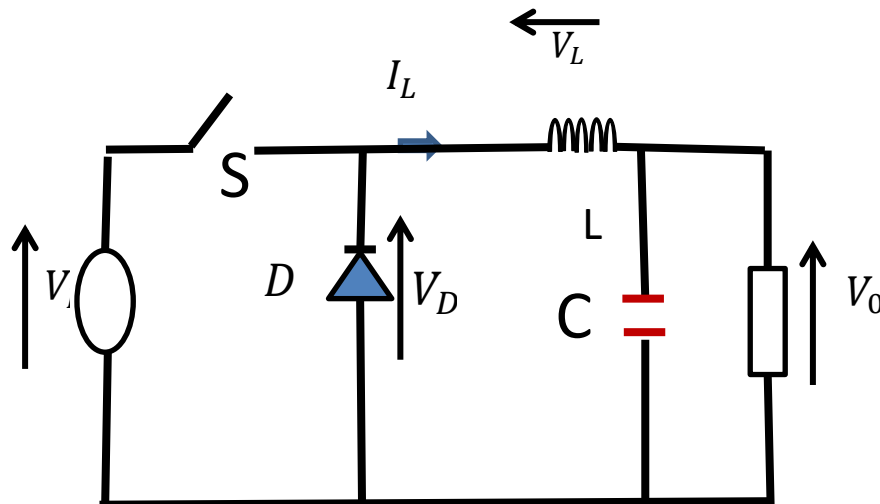
Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

II.3.1. Modélisation des hacheurs :

La modélisation des convertisseurs a pour but d'analyser le comportement dynamique de ceux-ci, afin de synthétiser les lois de commande nécessaires qui permettent d'atteindre les performances désirées.

La difficulté majeure vient du principe même de ces convertisseurs: ils sont non linéaires et présentent plusieurs configurations électriques distinctes lors d'une période de commutation.

La modélisation du comportement dynamique doit permettre de caractériser le fonctionnement de convertisseur DC-DC dans les deux modes de conduction (continu et discontinu) [15].



Fig(II.9) : Circuit équivalent d'un hacheur BUCK .

II.3.2.Modèle de Convertisseur Boost :

Ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

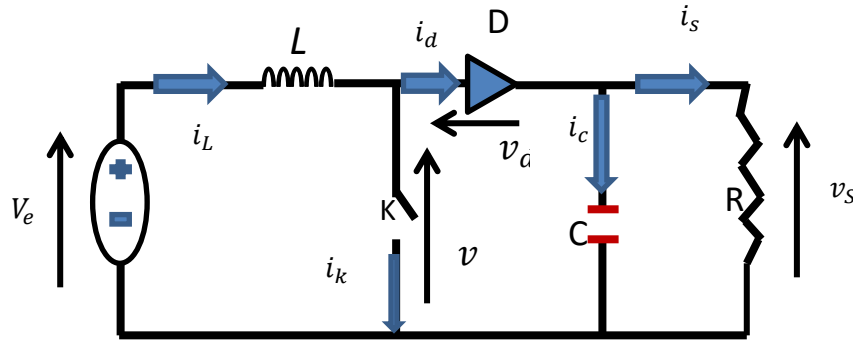


Fig (II.10) : Circuit équivalent d'un hacheur BOOST.

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur k (voir figure) :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur k (voir figure) est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique.
- La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

II.3.3.Modélisation du circuit:

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (2.9)$$

$$\Delta I_{L_{ON}} + \Delta I_{L_{Off}} = 0 \quad (2.10)$$

$$\Delta I_{L_{ON}} + \Delta I_{L_{Off}} = \frac{V_S D T}{L} + \frac{(V_S + V_0)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.11)$$

$$R = \frac{V_C}{I_0} \quad (2.12)$$

II.3.4.Représentation d'état :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_2 x + B_2 u \\ Y = C_2 X \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} I_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Pour $T \in [0 \quad DT_S]$, s et fermé:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} V_0 - L \frac{di_0}{dt} - Ri_0 = 0 \\ \dot{V}_C = \frac{1}{C} \times \frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0 \quad (2.17)$$

Pour $T \in [DT_S \quad T_S]$, (S)est ouvert :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} V_0 - L \frac{di_0}{dt} - Ri_0 - V_C = 0 \\ C \frac{dV_C}{dt} = I_0 - \frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0 \quad (2.20)$$

Donc le système sous forme matricielle devient:

$$\begin{cases} \dot{X} = (A_1 X + B_1 V_0)D + (A_2 X + B_2 V_0)(1-D) \\ V_0 = C_1 D + C_2 (1-D)X \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{1-D}{L} X_2 + \frac{1}{L} V_0 \\ \dot{X}_2 = \frac{1-D}{L} X_1 - \frac{1}{RC} X_2 \end{cases} \quad (2.20)$$

Alors: le module globale

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{L} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0 \quad (2.21)$$

A partir des équations, on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_S)DT_S = (V_0 + V_S) \times (1 - D) \times T_S \quad (2.22)$$

Le rapport de conversion M (D) s'écrit sous la forme suivante :

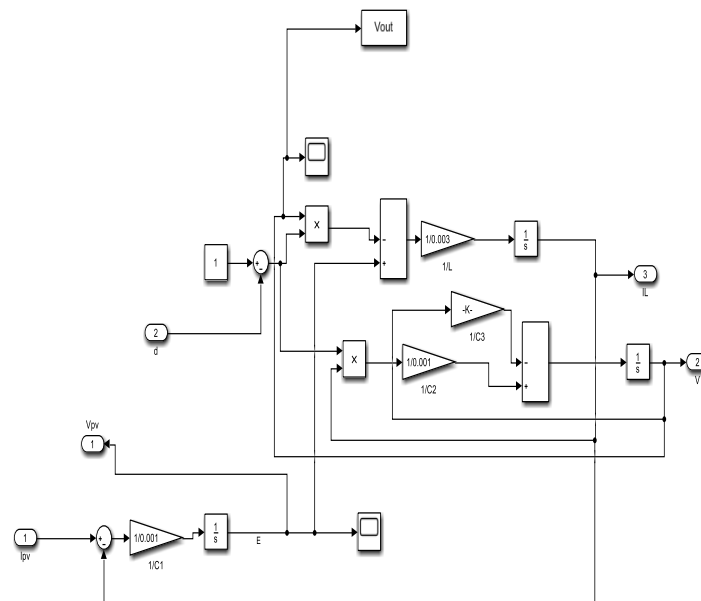
$$M(D) = \frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{1-D} \quad (2.23)$$

Le rapport cyclique de commutation D :

$$D = 1 - \frac{V_S}{V_0} \quad (2.24)$$

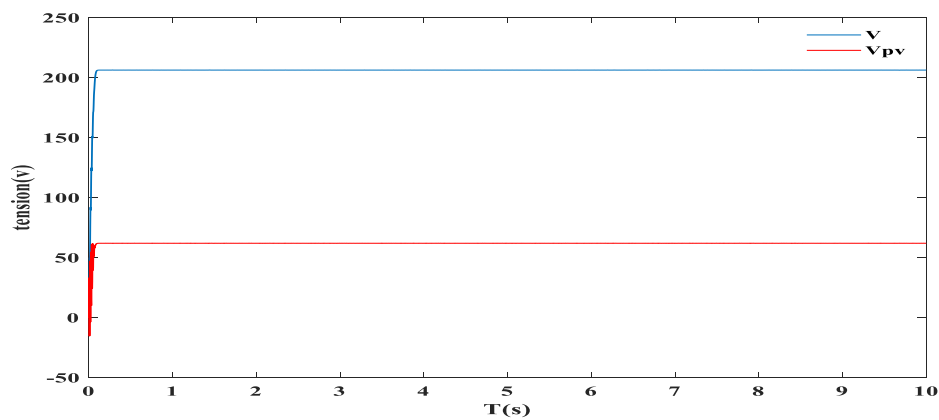
II.3.5.Simulation:

Pour étudier la tension et le courant externes du transformateur BOOST, nous le simulons à l'aide du programme MATLAB dans ses valeurs de $\alpha > 0,5$.



Fig(II.11) : Schéma de base d'un convertisseur Boost.

II.3.6.Résultat de la simulation:



Fig(II.12): Tensions de sortie convertisseur Boost pour $\alpha=0.7$.

✚ pour sa valeur $\alpha = 0.8$ On remarque que la tension de sortie est faible par rapport à l'entrée à une valeur de $\alpha > 0.5$ (Fig II.12) donc donc d'un convertisseur BOOST.

II.3.7. Modelé de Convertisseur Buck-Boost :

Le circuit est alimenté par une source de tension V_e , la sortie étant une charge résistive R et débite un courant I_s . L'interrupteur K , symbolisé ici comme un MOSFET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique (α) à la fréquence ($F=1/T$). Par un tel convertisseur, on cherche à fixer une tension moyenne V_s de sortie qui réponde aux critères suivants :

✚ $V_s < V_e$ ou bien $V_s > V_e$.

✚ V_s réglable à souhait en agissant sur le rapport cyclique (α) [16].

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_o et I_o) dans le convertisseur Buck boost sont liées à celles d'entrées en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

✚ En faisant varier la valeur du rapport cyclique à une certaine valeur, la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée ($V_o < V_s$), généralement dans la plage $0 = D < 0.5$, donc buck boost fonctionne comme un convertisseur abaisseur.

✚ Et la sortie est supérieure à la tension d'entrée ($V_o > V_s$) si le rapport cyclique est dans la plage de $0.5 < D = 1$, agit donc comme un convertisseur survolteur.

II.3.8. Modélisation du circuit:

$$\Delta I_{L_{ON}} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_s}{L} dt = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.25)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (2.26)$$

Représentation d'état:

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_3 x + B_3 u \\ Y = C_3 X \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\text{Avec : } X = \begin{bmatrix} I_o \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Pour étudier le convertisseur abaisseur-élevateur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

Pour $T \in [0 \quad DT_S]$, (s) est fermé :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) \end{cases} \quad (2.29)$$

et

$$\begin{cases} L \frac{di_0}{dt} = DV_0 + V_C(1-D) \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L(1-D) - \frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_0}{dt} = DV_0 \\ C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (2.31)$$

Pour $T \in [DT_S \quad T_S]$ s, est ouvert

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad (2.32)$$

et

$$\begin{cases} L \frac{di_0}{dt} = V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L - \frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (2.33)$$

Donc le système sous forme matricielle devient:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D}{T} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0 \quad (2.34)$$

A partir des équations, on peut écrire l'équation suivante :

$$V_S DT_S = V_0(1-D)T_S \quad (2.35)$$

Le rapport de conversion M (D) s'écrit sous la forme suivante :

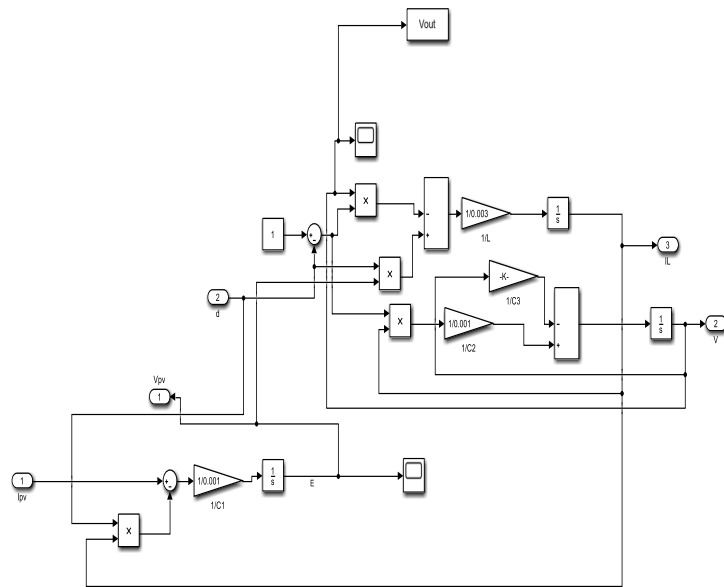
$$M(D) = \frac{V_0}{V_S} = \left(\frac{-D}{1-D} \right) \quad (2.36)$$

Cela donne en retour que:

$$D = \frac{V_0}{V_0 - V_i} \quad (2.37)$$

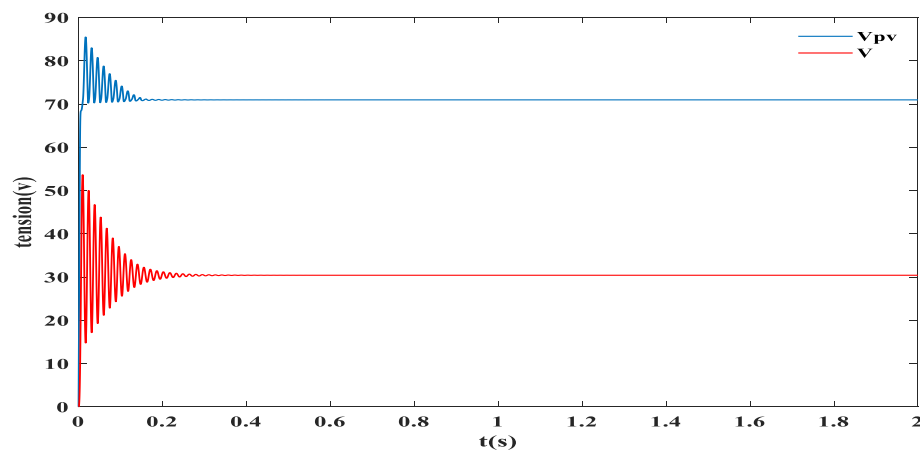
II.3.9.Simulation d'un convertisseur BUCK-BOOST en Matlab:

Pour étudier la tension externe convertisseur BUCK-BOOST, nous la simulons avec le Programme MATLAB à trois valeurs près $\alpha > 0.5$, $\alpha > 0.5$, $\alpha = 0.5$.

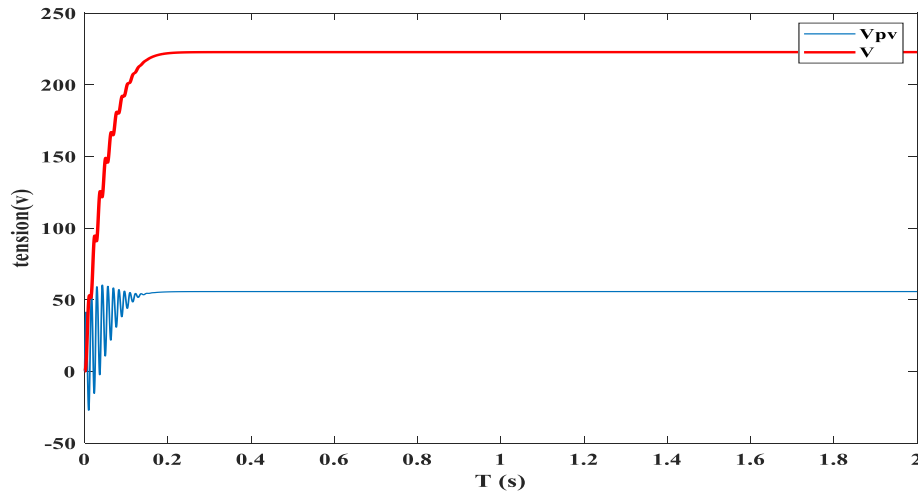


Fig(II.13) : Schéma de Simulation convertisseur BUCK-BOOST

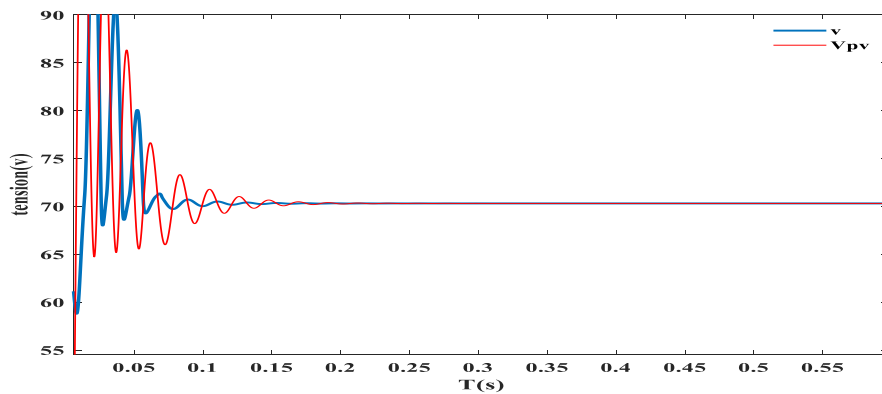
II.3.10.Résultat de la simulation:



(a)



(b)



(c)

Fig(II.14): Allure des tensions BOOST-BUCK Pour $\alpha = 0.3$ (a), 0.8 (b) et 0.5 (c).

Résultats de simulation sur des étudiants pour trois valeurs différentes α :

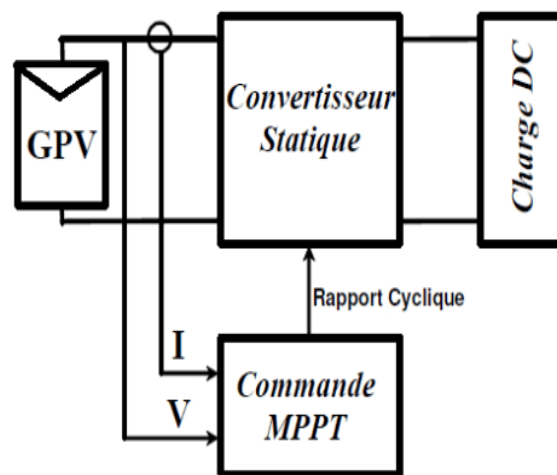
Pour sa valeur $\alpha = 0.3$ On remarque que la tension de sortie est faible par rapport à l'entrée à une valeur de $\alpha < 0.5$ (Fig.a) donc convertisseur BUCK

Pour sa valeur $\alpha = 0.8$ On remarque la tension de sortie est plus par rapport à la valeur d'entrée $\alpha > 0.5$ (Fig.b) donc convertisseur BOOST.

Pour une valeur $\alpha = 0.5$, on note sur la (Fig II.14) que la valeur de tension de l'entrée est égale à la sortie (Fig.c) .

II.4.1. Commande MPPT :

Contrairement aux sources de tension ou de courant, les modules PV ne peuvent pas imposer une valeur de tension ou du courant à leurs bornes, en raison de leur forte dépendance au rayonnement solaire et à la température. Afin d'éviter une perte d'énergie et d'assurer un fonctionnement avec le meilleur rendement (étant donné un rayonnement solaire et une température), le PPM doit être atteint comme point de fonctionnement. Pour assurer le fonctionnement des systèmes PV sur le PPM, des circuits spécifiques nommés "suivi du point maximal de puissance" (MPPT) sont utilisés [17].



Fig(II.15) : System MPPT.

II.4.2. Principe de la recherche de MPP :

La poursuite du point maximum de la puissance MPPT est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques.

Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [18].

II.4.3. Régulateurs MPPT:

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En

général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter avec la charge [19].

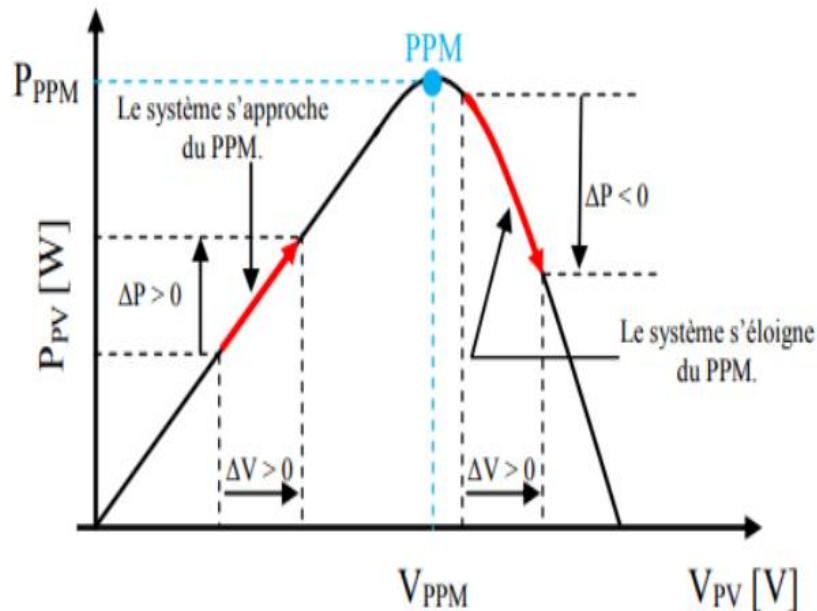


Fig (II.16) : Caractéristique aux bornes d'un panneau solaire- situation du Point de Puissance Maxima.

II.4.4.Méthodes MPPT:

Le suivi du point de puissance maximale (MPP) d'un réseau photovoltaïque est une étape essentielle d'un système PV. En effet, de nombreuses méthodes MPPT ont été introduites et de nombreuses variantes de chaque méthode ont été proposées pour surmonter des inconvénients spécifiques. Le grand nombre de méthodes proposées peut rendre difficile la détermination de la meilleure technique à adopter lors de la mise en œuvre d'un système PV. Les méthodes varient toutes en termes de complexité, de nombre de capteurs requis, de mise en œuvre numérique ou analogique, de vitesse de convergence, de capacité de suivi et de rentabilité. De plus, le type d'application peut avoir un impact significatif sur le choix de l'algorithme MPPT [20].

II.4.5.Les algorithmes de MPPT Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont [21] :

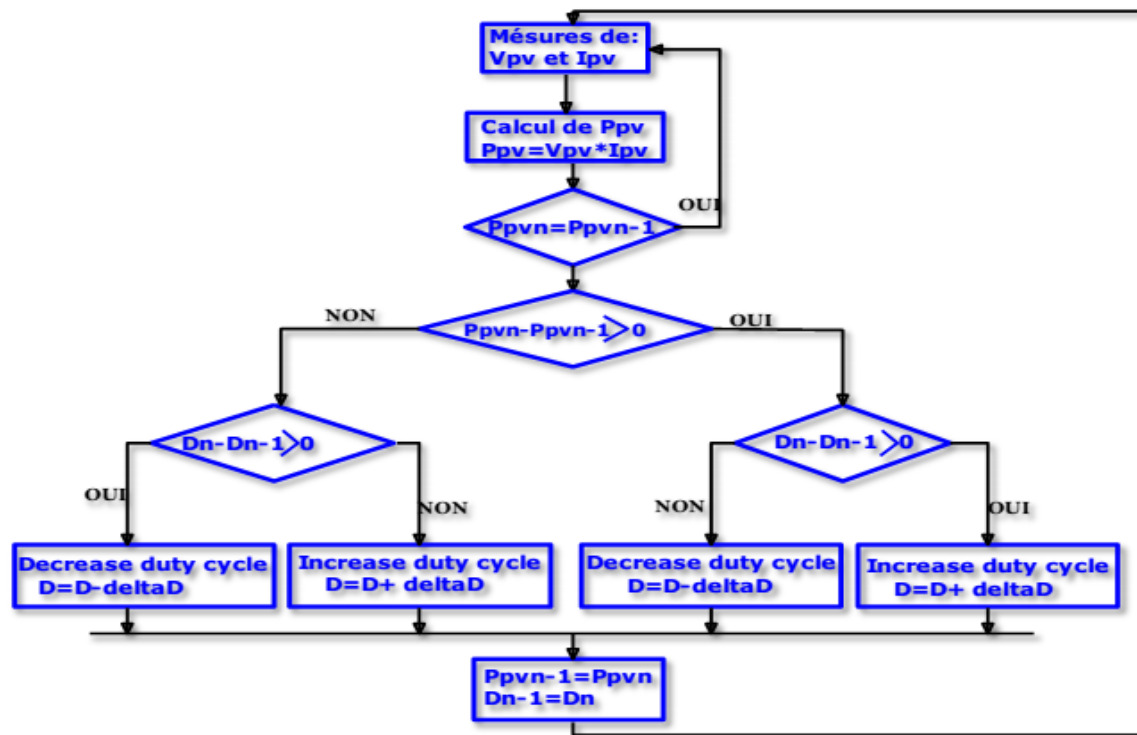
- ✚ Algorithme de la tension Constante (CV, Constant Voltage) .
- ✚ Algorithme du Courant constant (Constant Curent) Perturbation et Observation (P&O, perturbe and Observe).

- ✚ Conductance incrémentale (Inc. Cond, Incremental conductance).
- ✚ Proportionnel- Intégral- Dérivé (P I D) .
- ✚ Logique Floue.
- ✚ mode glissant.

II.4.6.Méthode de perturbation et observation:

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure 5 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure 5, la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle[21] [22].

- ✚ Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement.
- ✚ Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple C_p .
- ✚ Si C_p est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- ✚ Si C_p est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur C_p idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement [21].

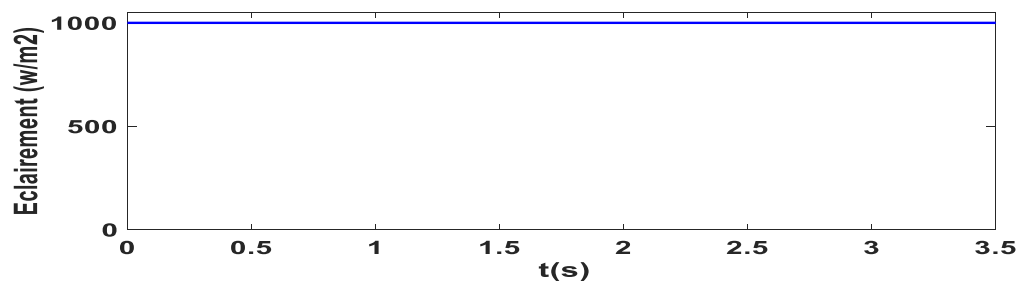


Fig(II.17):Algorithm MPPT perturbation and observation (P&O) [23] [24] .

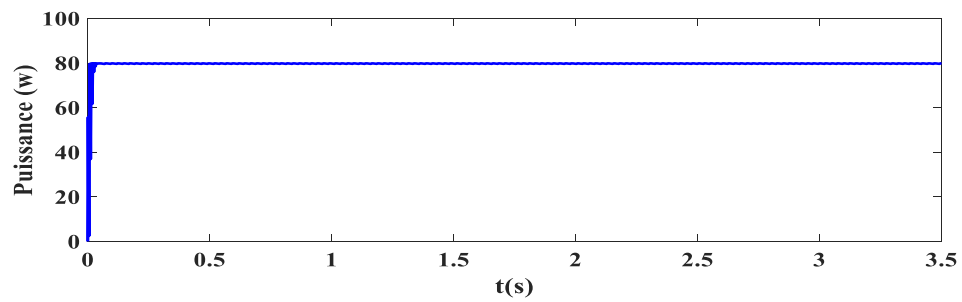
II.4.7.Résultat de simulation :

Les fig (II.19) (a,b,c) suivantes montrent les résultats de simulation de la puissance, courant et tension respectivement de la technique P&O appliqué un générateur pour un éclairage fixe **fig(II.18)**.

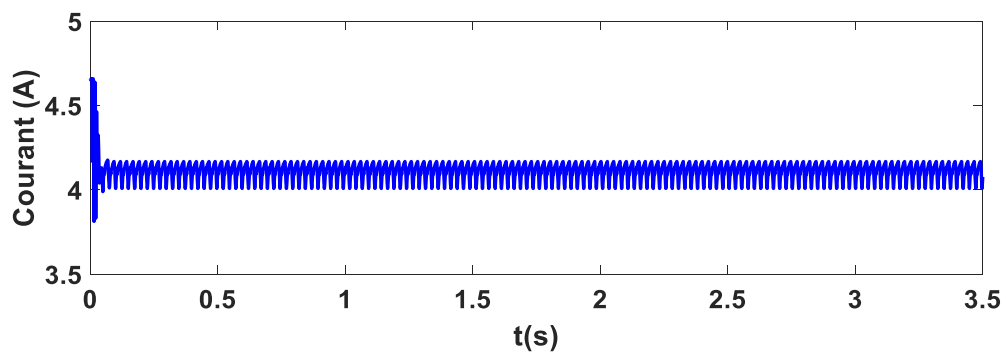
De ces graphes, le contrôleur MPPT par la method P&O extraite la puissance optimale pendant toute l'intervalle de temps, ce qui prouve par conséquent l'efficacité de l'algorithme P&O.



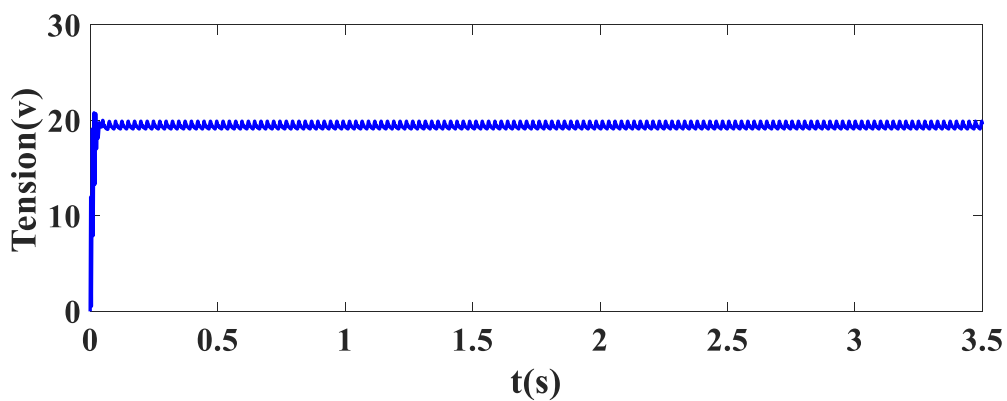
Fig(II.18):Profile de l'éclairement.



a



b



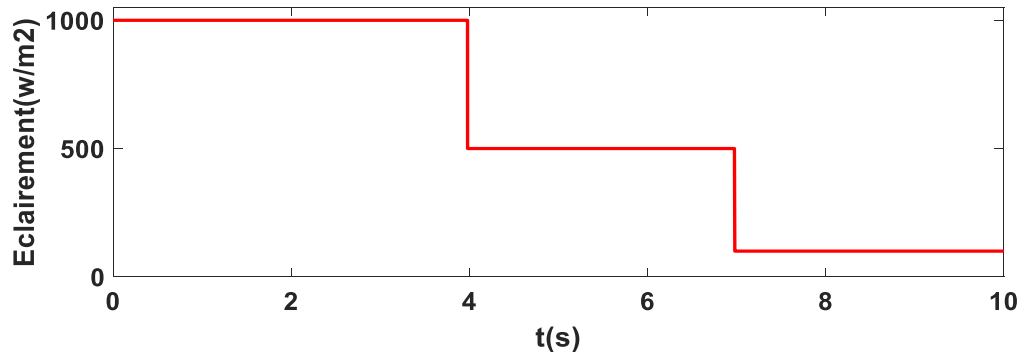
c

Fig (II .19) (a,b,c): suivantes montrent les résultats de simulation de la technique P&O appliquée un générateur pour un éclairement fixe.

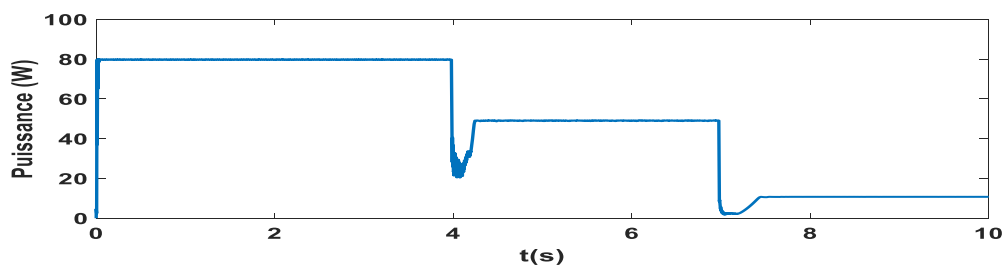
Lorsque le générateur PV subit des variations de l'éclairement qui sont représentées sur la

Fig. (II.19) nous avons représenté la puissance d'entrée du convertisseur **Fig (II .20)** pour une charge et température constantes.

On a vu que la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point PPM. Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que la commande MPPT utilisée contrôle bien le fonctionnement du générateur PV autour des conditions optimales.



Fig(II.20) : Profile de l'éclairement.



Fig(II.21): Profile de puissance.

II.5.1. Conclusion :

Ce chapitre présente l'architecture de système photovoltaïque, le rôle et les caractéristiques de chaque composant. Principalement le modèle de cellule photovoltaïque et les effets des variations des conditions climatiques sur le fonctionnement de ce système sont décrits. Finalement, on a entamé Le suivi du point de

Puissance maximale (abrégé MPPT). La techniques de commandes MPPT utilisé est la technique P&O. Cet technique ou le tracker MPP permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique. Pour simplifier la compréhension, l'explication suivante est appliquée à un système de panneaux photovoltaïques.

Chapitre III

Réalisation des systèmes de commande MPPT

III.1 Introduction :

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments du système Photovoltaïque, nous allons mener dans ce chapitre les étapes et les résultats de réalisation de l'hacheur buck-boost avec la commande MPPT par l'algorithme perturbé et observe obtenus au cours de cette étude.

III.2 Réalisation du hacheur Buck-Boost :

Pour la réalisation de ce convertisseur, nous avons passé par deux étapes :

III.2.1 Réalisation de circuit imprimé :

Toutes les cartes électroniques que l'on trouve dans un PC, la carte mère et les cartes d'extension, sont réalisées à partir de circuits imprimés, en abrégé : PCB pour « Printed Circuit Board ». La plaque isolante d'un PCB est généralement constituée de fibre de verre noyée dans de l'époxy. L'époxy est une résine thermodurcissable, rigide et isolante. Il existe d'autre part des circuits imprimés souples, pour lesquels le support est alors une matière plastique flexible. Des pistes de cuivre sont imprimées à la surface du PCB. Ces pistes conductrices servent aux interconnexions entre les composants électroniques soudés sur la carte.

On parle de circuits « simple face » lorsque les pistes de cuivre ne se trouvent que sur une seule face de la carte, celle que l'on appelle « côté soudure » alors que l'autre face est appelée « côté composants ». Ces circuits « simple face » ne conviennent que pour des schémas ne nécessitant que peu d'interconnexions électriques entre les composants [25]

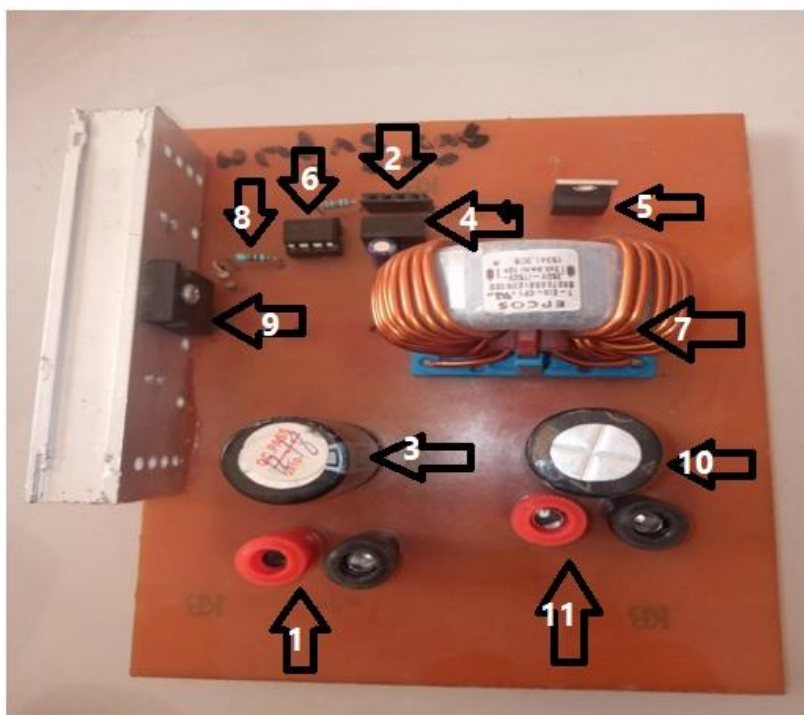
A notre réalisation, nous avons travaillé sur le circuit « simple face ». La figure (3.1) représente la réalisation de circuit du hacheur sous logiciel « Proteus » (ARES) pour l'imprimer sur la plaque.



Fig(III-1) Circuit imprimé du hacheur réalisé

III.2.2 Soudure des composants électroniques :

Avant la soudure, nous avons fait le perçage des trous qui serviront au passage des broches des composants. Les composants sont soudés aux pistes du circuit imprimé par un alliage à base d'étain. Le résultat final de la soudure est représenté par la figure (III.1).



Figure(II-2) schema de l'hacheur buck boost

1	L' entrée du hacheur
2	L' entrée de la commande (Arduino).
3	Les condensateurs d'entrée (470 μ F/250V)
4	L'opto-coupleur
5	Régulateur 15 V
6	Driver IR2113 (voir annexe A)
7	L'inductance « la bobine » (3.3 μ H)
8	Resistance 100 Ω
9	Le Transistor « MOSFET » (voir annexe C)
10	Les condensateurs de sortie (470 μ F/250V)
11	La sortie du hacheur

Tableau (III-1) Différents composants du hacheur réalisé.

III.3 Carte Arduino UNO :

L'Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses.

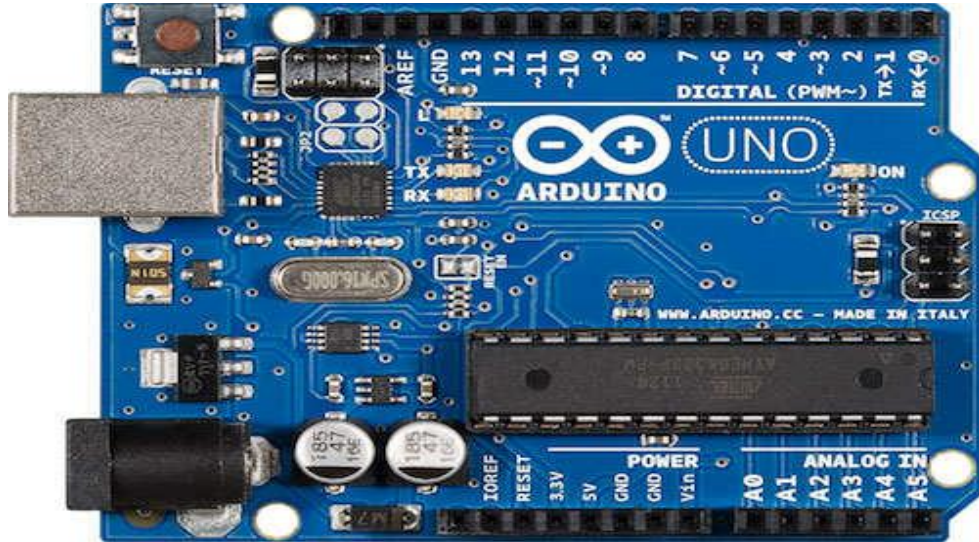
Le système Arduino donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Plus précisément, pour programmer des systèmes électroniques.

Le gros avantage de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie grandement les schémas électroniques et par conséquent, le coût de la réalisation, mais aussi la charge de travail à la conception d'une carte électronique [29].

L'Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ; le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des appareils mobiles (modélisme) [26].

Le modèle UNO est une carte électronique basée sur le microcontrôleur ATMEGA de référence ATMEGA328. L'ATMEGA328 est un microcontrôleur 8 bits de la famille AVR.

La programmation peut être réalisée en langage C/C++ [24]. Le modèle UNO contient 14 entrées/sorties (dont 6 fournissent la sortie PWM), 6 entrées analogiques, un cristal à 16 MHz, une connexion USB, une prise jack d'alimentation, un en-tête ICSP et une fonction reset [27].



Fig(III-3) Carte Arduino UNO [29].

III.4 Différents composants du système :

III.4.1 Module CEM 80M-36 :

Dans notre réalisation, nous utilisons un module PV du type photovoltaïque CEM 80M-36.

Ce module PV est en silicium monocristallin et constitué de 36 cellules PV élémentaires.

Il est fabriqué par le constructeur algérien « Condor ».

Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 80 Wc, un courant de 4.35A sous une tension optimale de 18.5V.

Les caractéristiques électriques de ce module PV sont :

- Puissance maximale (Pmax) : 80Wc
- Tolérance de puissance : $\pm 5\%$
- Courant à (Iop) : 4.35 A
- Tension à (Vop) : 18.5 V

- Courant en court-circuit (I_{cc}) : 4.66 A
- Tension en circuit ouvert (V_{oc}) : 22.5 V



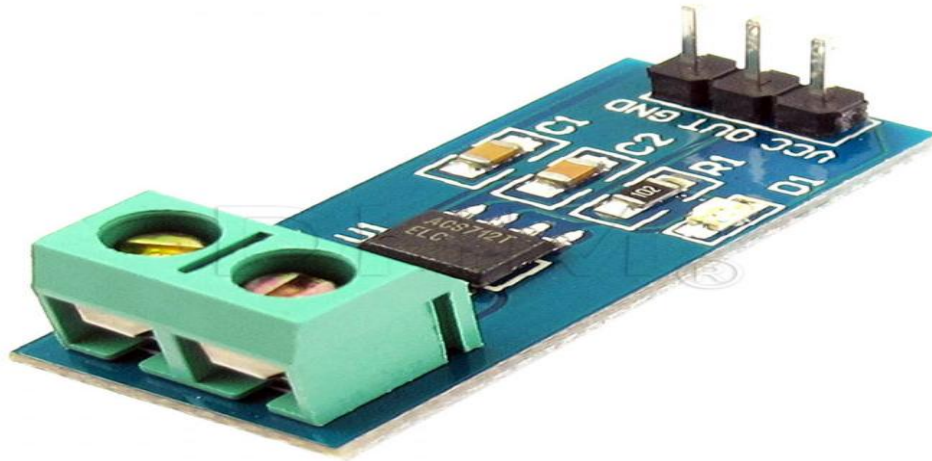
Fig (III-4) Module CEM 80M-36.

III.4.2 Capteur de courant AC712 :

Le dispositif ACS712 Allegro offre un moyen économique et précis de détection de courants AC et DC. Ce capteur de courant Allegro ACS712 est basée sur le principe de l'effet Hall, qui a été découvert par le Dr Edwin Hall en 1879 selon ce principe, quand un conducteur de courant est placé dans un champ magnétique déposé, une tension est générée sur ses bords perpendiculaires à la direction à la fois du courant et du champ magnétique.

La sortie du dispositif a une pente positive lorsqu'un courant augmentant circule à travers le chemin de conduction de cuivre.

Le ACS712ELC-05A peut mesurer le courant jusqu'à $\pm 5A$ et fournit la sensibilité de sortie de 185 mV/A (à +5V) [55]



Fig(III-5) Capteur de courant ACS712.

III.4.3 Capteur de tension :

Ce module est basé sur la division de tension par pont diviseur de rapport 1/5.

Ce module possède 2 résistance, une de $7.5k\Omega$ et l'autre de $30k\Omega$, ce qui équivaut à un rapport de 1/5 entre la tension d'entrée et la tension de sortie.

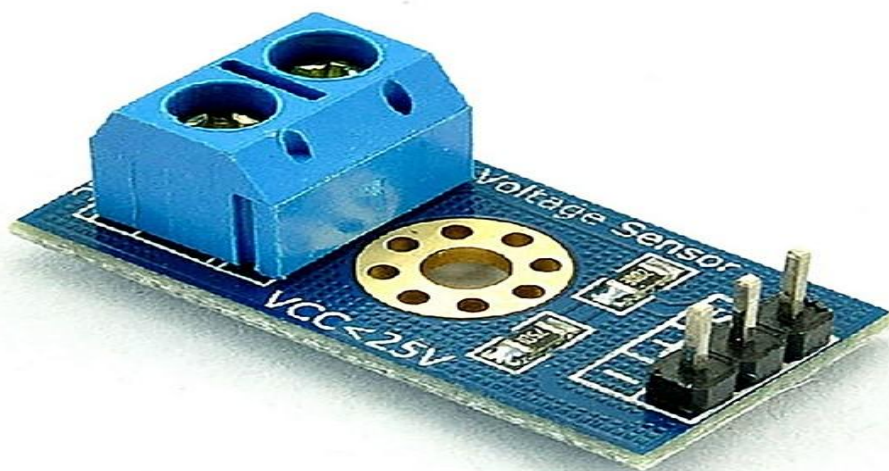


Fig (III-6) :Capteur de tension.

III.5. Montage du système complet :

La figure (III-6) représente le système complet de la commande mppt avec l'hacheur buck-boost.

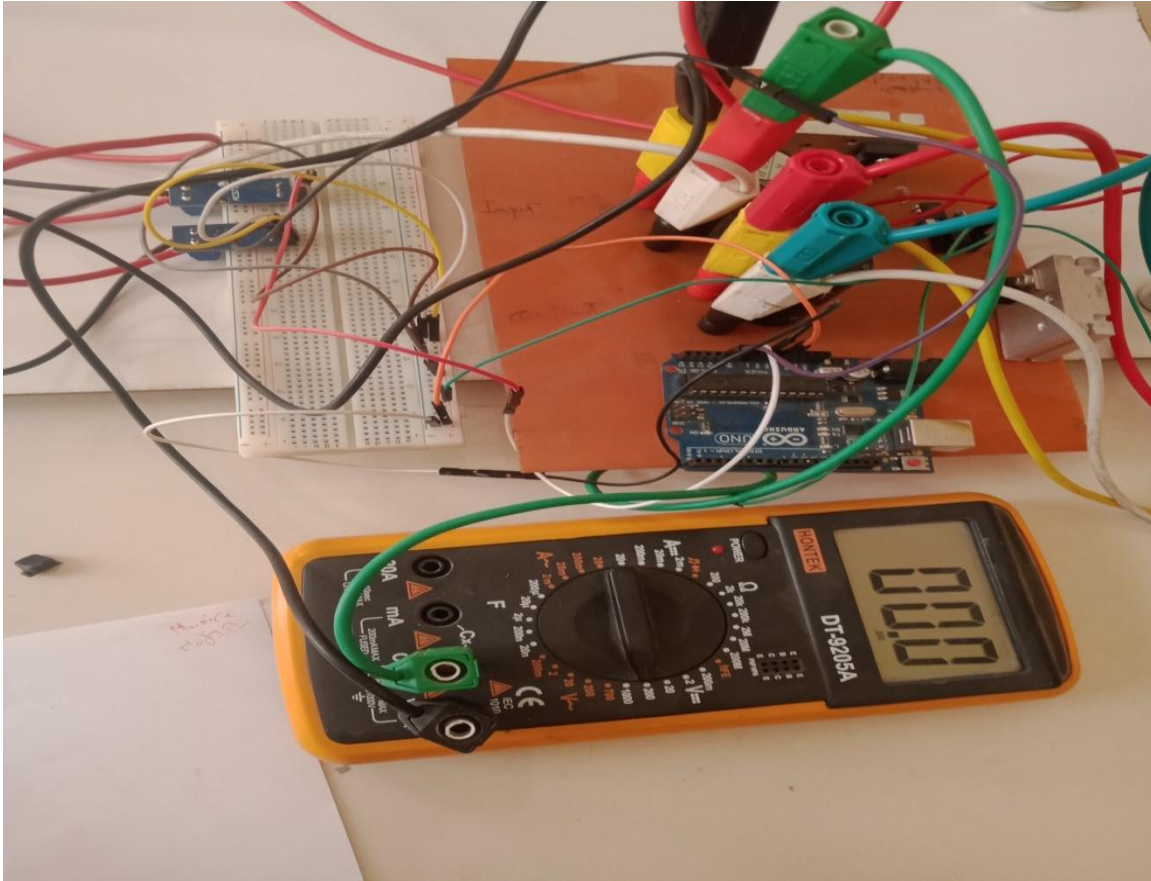


Fig (III-7) Système PV réalisé.

III.5. Test et Résultat :

III.5.1. Test de l'hacheur buck-boost :

En réalisant le montage complet, Le microcontrôleur d'Arduino mesure les signaux I_{pv} et V_{pv} , qui sont filtrés à travers les pin A0 et A1. Le microcontrôleur traitera ces informations et il les multiplie pour calculer la puissance moyenne, on a effectuée plusieurs tests :

Dans un premier temps, nous avons simulé le fonctionnement du système pour différentes valeurs de rapport cyclique α afin de confirmer les modes de fonctionnement :

La figure de (III-8) représente l'évaluation de la tension de sortie de l'hacheur durant le test avec une rapport cyclique α de 0.4.

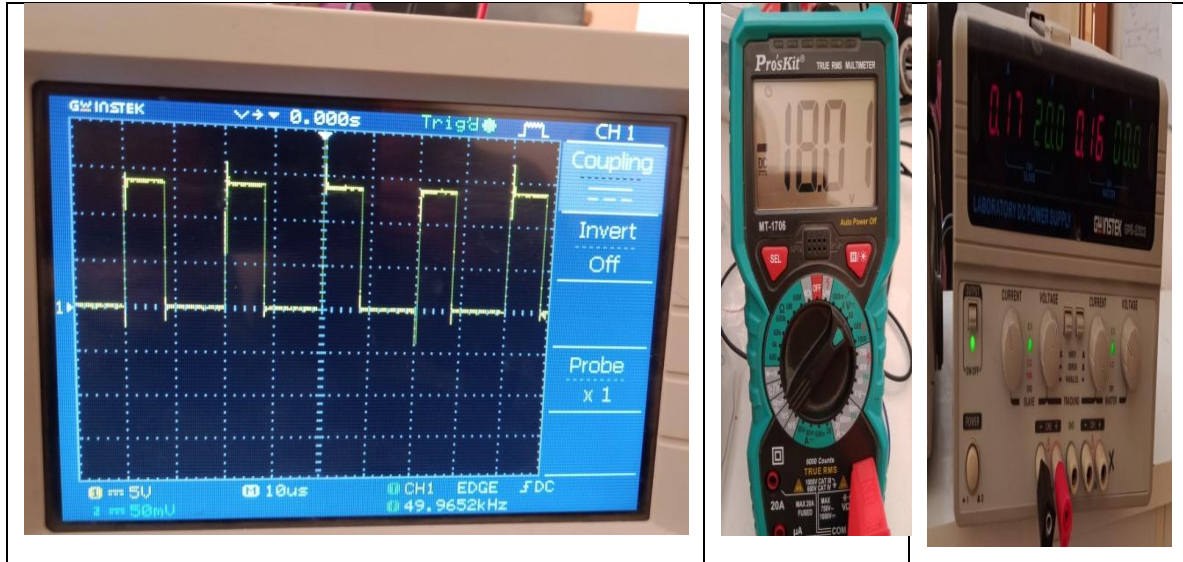


Fig (III-8) : Rapport cyclique avec $\alpha=0.4$.

A	VPV (V)	Vchagre (V)
40%	20	18

On conclure que dans ce cas l'hacheur fonctionne comme hacheur dévolteur (buck)

La figure de (III-8) représente l'évaluation de la tension de sortie de l'hacheur durant le test avec une rapport cyclique α de 0.7.

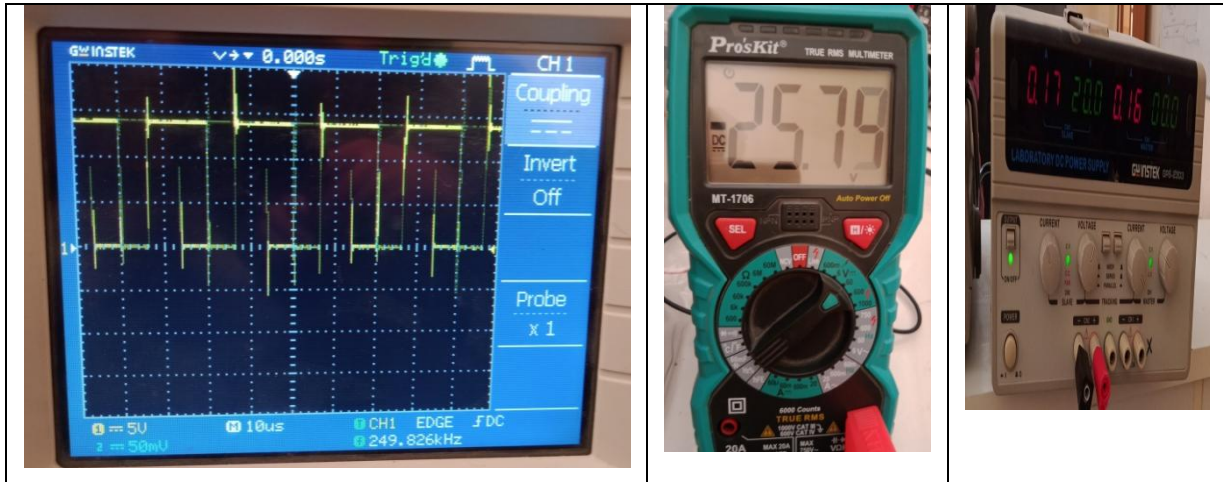


Fig (III-8) : Rapport cyclique avec $\alpha=0.7$

A	VPV (V)	Vchagre (V)
70%	20	25.74

Donc dans ce cas l'hacheur fonctionne comme hacheur survolteur (boost)

III.6. Résultats pratique de l' MPPT P&O :

III.6.1. Résultats pratiques sans changement d'éclairement :

Les résultats pratiques de puissance courant, tension et rapport cyclique α du système photovoltaïque réalisé sont donnée sur les figures (III-9) à (III-10) à (III-11) à (III-12) pour une charge résistive de 50Ω et avec éclairement fixe, en appliquant l'algorithme P&O. Ces résultats montrent que le système PV fonction.

Ces résultats montre la rapidité du suivi de point de puissance maximale et l'oscillation autour de point de fonctionnement de l'algorithme P&O.

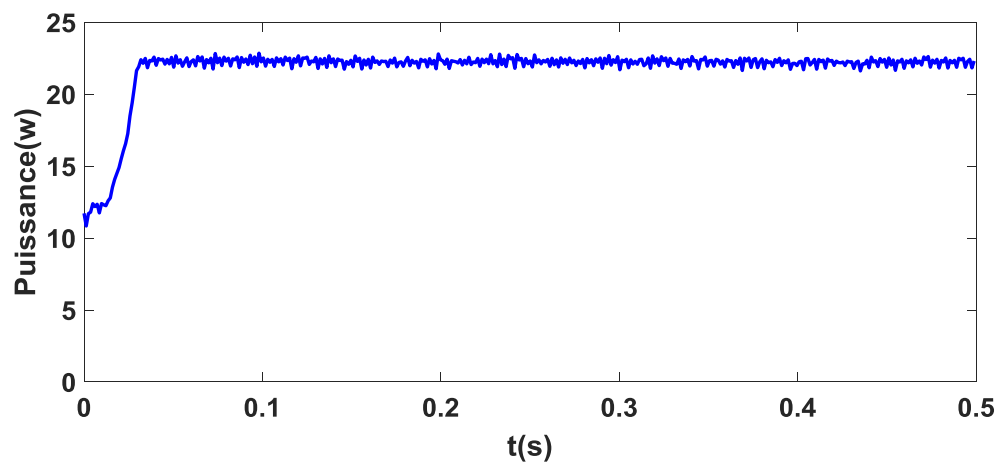
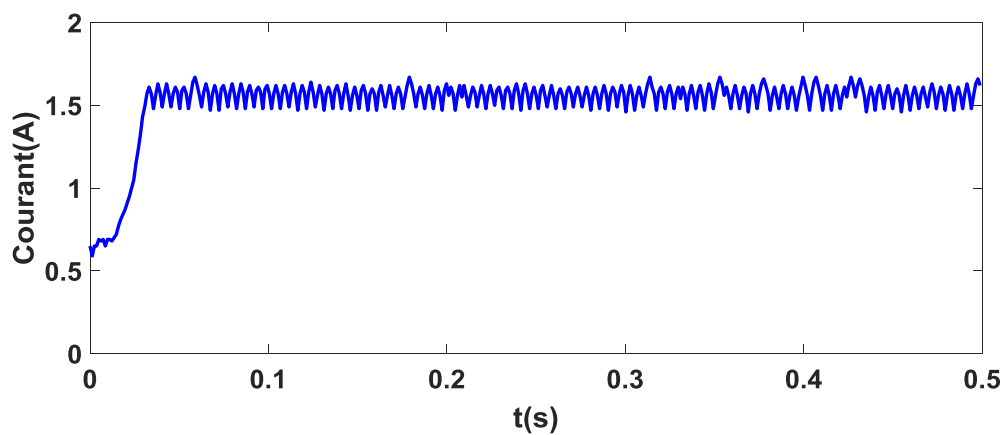
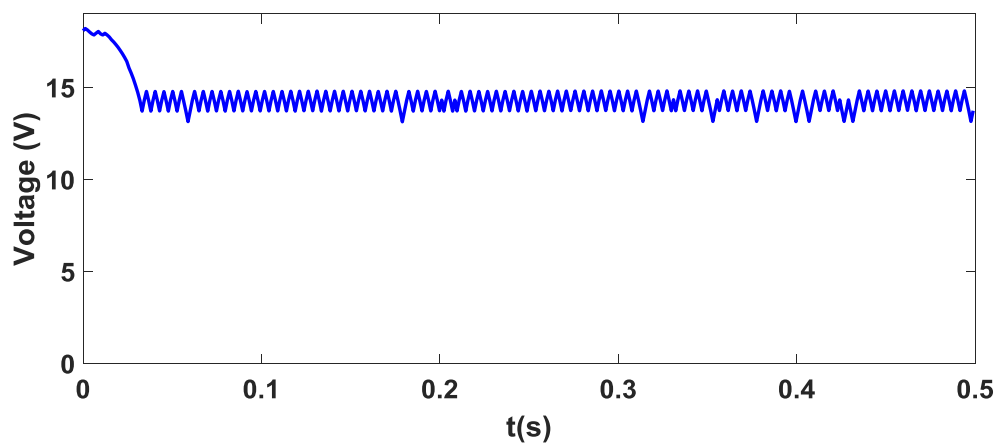


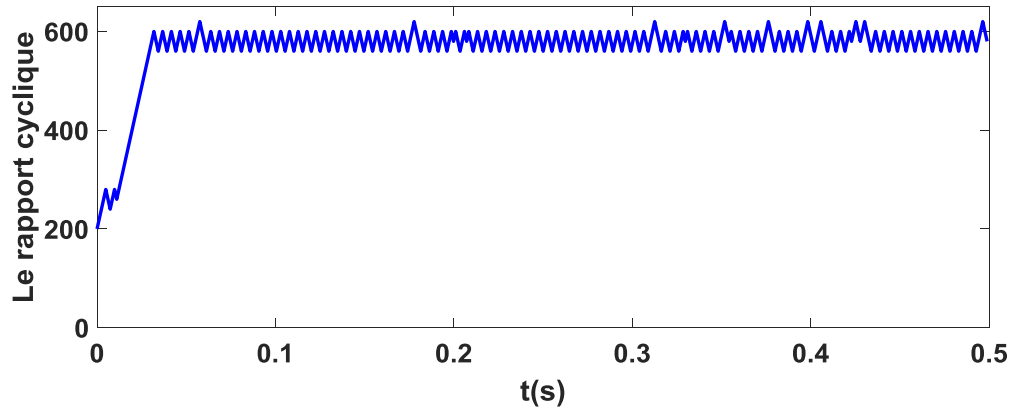
Fig (III.9) : puissance de panneau photovoltaïque



Fig(III.10).Courant de panneau photovoltaïque



Fig(III.11).Voltage de panneau photovoltaïque



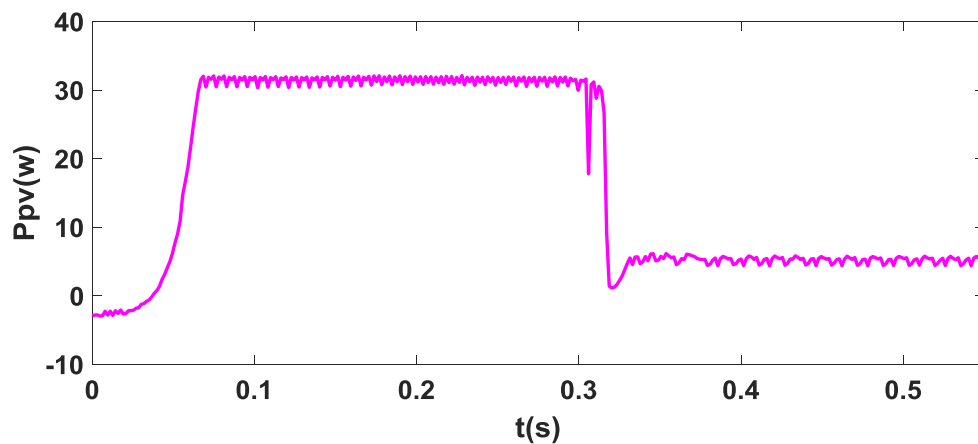
Fig(III.12) :.Rapport cyclique de l'hacheur

III.6.2. Résultats pratiques avec changement d'éclairement :

Les figures (III-13) à (III-14) à (III-15) à (III-16) Présent la puissance courant, tension et rapport cyclique α du système photovoltaïque réalisé charge résistive de 50Ω et avec éclairement variable en appliquant l'algorithme P&O.

Ces résultats pratiques montrent que l'algorithmes de MPPT (P&O) présentent une bonne capacité de suivre le MPP et d'augmenter les performances du système PV lorsqu'un changement rapide de l'irradiation se produit. La commande par l' algorithmes adapte le générateur PV à la charge par le transfert de la puissance maximale fournie par le GPV.

Dans ce cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le changement d'éclairement (qui dure 0.32 s), le rapport cyclique du convertisseur, diminue puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au point PPM.



Fig(III.13) puissance de panneau photovoltaïque

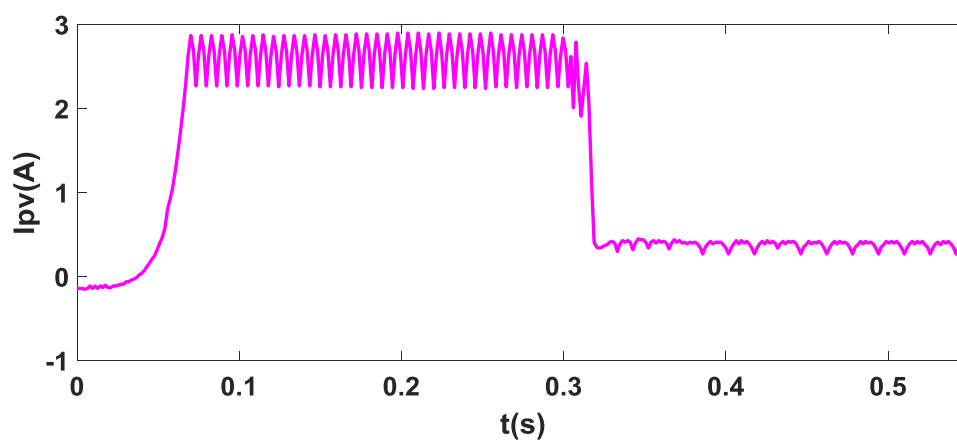
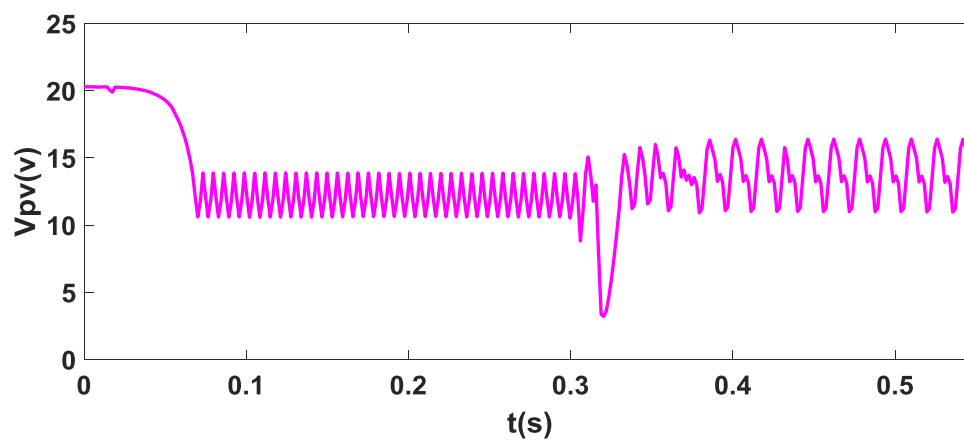
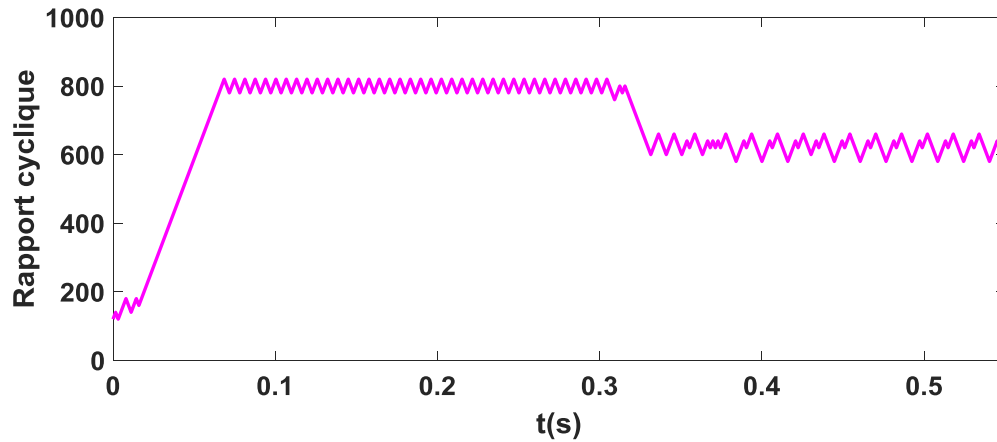


Figure (III.14).Courant de panneau photovoltaïque



Fig(III.15).Voltage de panneau photovoltaïque



Fig(III.16) :Rapport cyclique de l'hacheur

III.7.Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la réalisation de l'hacheur buck-boost en utilisant la carte Arduino UNO. Ensuite, nous avons cité les différents composants du système, tel que le module CEM 80M-36, le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous avons fait des tests pratiques sur le système PV par la méthodes de commande MPPT : « P&O ». Les résultats de tests pratiques montrent que le système PV transfère la puissance maximale fournie par le module PV à la charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite la simulation et l'implantation d'un système photovoltaïque fonctionnant avec des convertisseur Buck- Boost. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur ou abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et à la variation de la charge.

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes MPPT ont été étudiées pour la poursuite du point maximum de puissance. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place d'une commande MPPT permettant de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances. On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale. On a présenté l'algorithme de perturbation et observation. Cette dernière est utilisée dans ce travail à cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

D'après les résultats de simulation et de réalisation obtenus, 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 ou inférieure à celle fournie par le générateur PV en jouant sur le duty cycle.
- Le régulateur MPPT par la méthode P&O donne un suivi adéquat de la puissance maximale du générateur photovoltaïque, avec une oscillation moindre autour de sa référence et permet la poursuite du point optimum lors d'une variation brusque de l'éclairement ou de la charge.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]BOUZID Kheir eddine « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno » , Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [2]TOUIL Nacer Eddine '« Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhderd El-Oued, 2015.
- [3]M.Z.F.Z.Zerhoun, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique » Revue des énergies renouvelables, vol. 11 , N°1, p. 41–49, 2008.
- [4]A.Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [5]Brunton, S.L., Rowley, C.W., Kulkarni, S.R., Clarkson, C., 2009. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using extremum seeking, in: 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Presented at the 2009 34th IEEE Photovoltaic
- [6]SpecialistsConference(PVSC),pp.000013–000016.
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411777>
- [7]Esrarn, T., Chapman, P.L., 2007a. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Trans. Energy Convers. 22, 439–449.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>
- [8]Kassmi, K., Hamdaoui, M., Olivié, F., 2007. Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique 10, 4–451.
- [9]BOUKHERS Djamil « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Memoire Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [10] Riolet, E., 2017. Solaire à la pérovskite [WWW Document]. Httpssolutions-Altern. URL <https://solutions-alternatives.org/solaire-a-perovskite/> (accessed 6.25.18).
- [11] Havared breysnes Vika « modelling of photovoltaic modulees with battry

energy storage in simulink/matlab ». June 2014.

[12] RUPESH Patel Roll « Design and Implementation of an Isolated Solar photovoltaic power generation system » Memoire Master, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, June 2014.

[13] Meliani, S.M., 2016. Cours-Master1

[14] S.C. Tan, Y.M. Lai, C. K. Tse, and M.K.H. Cheung, "Adaptive Feedforward and Feedback Control Schemes for Sliding Mode Controlled Power Converters," IEEE

[15] Dimensionnement et conception des hacheurs Buck-BOOST & CUK

[16] Roberto F Coelho, Walbermark M Dos Santos, and Denizar C Martins. Influence of power converters on PV maximum power point tracking efficiency. In 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, pages 1–8. IEEE, 2012.

[17] Abid Abderrahmane, "Application De La Logique Floue Pour La Poursuite De Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque", Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2014/2015.

[18] Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport_PIP_Microtransat_Energie_I, "Partie électronique et énergétique", 2005- 2006.

[19] Bacem GAIED CHORTANE "Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle ", MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE M. SC. A. MONTRÉAL, LE 4 JUILLET 2022

[20] Par BEN MAMMAR Manel , DEKKICHE Daou "Etude comparative de quelques techniques de commande MPPT à base de la Conductance Incrémentale pour les systèmes photovoltaïques " Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj , Année Universitaire 2021/2022.

[21] H. Knopf, 'Analysis, Simulation and Maximum of Evaluation Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle', Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.

- [22] J. Fadat, ‘Chaîne de Conversion d’Energie Photovoltaïque Commande MPPT’, La Revue 3EI, N°43, Décembre 2005
- [23] V. Boitier, P. Maussion “ Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques”, 1 LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.
- [24] A. Yafaoui., B. Wu and R. Cheung“ implementation of maximum power point tracking algorithm for residential photovoltaic systems”, 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007
- [25] Mr. Faraheddine BELKACEM, “Contribution à La Commande Des Convertisseurs DC-AC Alimenter Par Un Panneau Photovoltaïque”, Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Électrique, Université de Picardie Jules Verne,2006.
- [26] www.arduinoHome.cc consulté 25/03/2023 11 :39
- [27] <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> consulté 03/05/2023 10 :45
- [28] www.openplatform.cc consulté 02/04/2023 10 :45
- [29] Arduino.odt