



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Automatique*

Spécialité : *Automatique et système*

➤ **Par : Tayebi Nourredine**

Thème

**Implémentation des algorithmes de poursuite
appliqués au système photovoltaïque par
arduino**

Soutenu publiquement le. 21 /09 /2020

Devant le jury :

Dr. CHOUIA Faycel	M.C.B	Univ. Ghardaïa	Président
Dr.FIHAKHIR Amine Mehdi.	M.C.B	Univ. Ghardaïa	Examineur
Dr BEKKAR Belgacem	M.C.B	Univ. Ghardaïa	Examineur
Dr. Borni Abdelhalim	M.A.A	URAER. Ghardaïa	Encadreur
Dr. Bechouat Mohcene	M.C.A	Univ. Ghardaïa	co-encadreur

Année universitaire 2019/2020



Remerciements

Je tiens premièrement à remercier avec prosternation, Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon encadreur, le docteur Borni Abdelhalim (Maitre de Recherche Classe A à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa), pour avoir dirigé mes travaux de recherche ainsi que pour leurs disponibilités, leur patience et leurs précieux conseils.

Je tiens également à remercier vivement mon co-encadreur, le docteur Bechouat Mohcene (département D'automatique, Université de Ghardaïa), pour sa disponibilité, son aide et de m'avoir fait profiter de son expérience et pour tout ce qu'il a met en œuvre afin que ce travail se déroule dans de bonnes conditions.

Je remercie monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui ont tant sacrifié pour moi ;

Mes frères et mes sœurs ;

Mes oncles et mes tantes, cousins et cousines ;

Tous mes amis(es) ;

Toute la promotion d'automatique 2020 ;

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Un générateur photovoltaïque (GPV) présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM (Point de puissance maximale). En mode connexion directe on peut trouver un grand écart entre la puissance débitée par le GPV et celle réellement transférée à la charge.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique la plus usuelle consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge ; l'étage d'adaptation adopté est un hacheur MPPT.

L'objectif de ce travail porte sur l'étude et la conception des hacheurs MPPT commandés par Arduino-Uno en utilisant la méthode de poursuite classique (perturbation et observation (P&O) »et d'incrémentation de la conductance(IncCond)).Les résultats de simulation obtenus des hacheurs sous l'environnement proteus sont validés expérimentalement au sein du Laboratoire de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable (URAER) de Ghardaïa.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Hacheur MPPT, P&O, Arduino-Uno.

Abstract:

A photovoltaic generator (GPV) has a nonlinear $I(V)$ characteristics with PPM (Maximum Power Point). In direct connection mode, a large gap can be found between the power delivered by the GPV and the power actually transferred to the load. In order to extract at any moment the maximum power available at the GPV boundaries and transfer it to the load, the most usual technique consists in using an adaptation stage between the GPV and the load; the adaptation stage Adopted is an MPPT chopper. The objective of this work is to study and design an MPPT choppers controlled by Arduino-Uno using the most popular classic algorithm (Perturb and Observe (P & O)and algorithm conductance increment (IncCond)).The simulation results obtained of the choppers under proteus are validated experimentally in the Laboratory of the Applied Renewable Energy Research Unit (URAER) in Ghardaïa.

Keywords: Photovoltaic generator, MPPT Chopper, P & O, Arduino-Uno.

ملخص:

المولد الكهروضوئي (GPV) له خصائص (تيار- توتر) غير خطية ذات نقطة استطاعة وحيدة (MPP) . عند الاتصال المباشر، هناك فجوة كبيرة بين الطاقة التي يولدها المولد الكهروضوئي والطاقة المنقولة فعلا إلى الحمل . من أجل استخراج - في أي لحظة- الطاقة القصوى المتاحة ونقلها إلى الحمل ، التقنية الأكثر شيوعا تتمثل في استخدام جسر مطابقة بين المولد و الحمل ، جسر المطابقة الملائم عبارة عن مطبر MPPT. الهدف من هذا العمل هو دراسة وتصميم المطبرات متحكم فيها بواسطة اردوينو- أونو باستخدام الخوارزمية الكلاسيكية الأكثر شيوعا (التشويش و الملاحظة (P & O) و خوارزمية زيادة التوصيل(IncCond)) يتم التحقق من نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تحت بيئة بروتس تجريبيا في مختبر وحدة البحث التطبيقي في الطاقة المتجددة(URAER)في غرداية.

كلمات البحث :المولد الكهروضوئي ،المطبر MPPT ، P & O ، اردوينوأونو.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les panneaux photovoltaïques

I.1 Introduction	3
I.2 Le rayonnement solaire	3
I.2.1 Le spectre solaire	3
I.2.2 La durée d'insolation.....	5
I.3 Les cellules photovoltaïques	5
I.3.1 Effet photovoltaïque	6
I.3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques	7
I.3.3 Rendement de conversion des cellules photovoltaïques.....	10
I.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	11
I.5 Caractéristique Courant-Tension d'un Générateur photovoltaïque.....	14
I.5.1 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	15
I.5.2 L'association en parallèle, série, mixte des modules :	18
I.6 Conclusion	19

Chapitre II : Les Convertisseur DC/DC (Les hacheurs)

II.1 Introduction	20
II.2 Etude théorique	20
II.2.1 Hacheur dévolteur «Buck »	21
II.2.2 Hacheur survolteur «Boost »	22
II.3 Dimensionnement des Hacheurs	23
II.3.1 Introduction	23
II.3.2 Dimensionnement de l'inductance	23

II.3.3 Dimensionnement du condensateur.....	24
II.4 Simulation sous Matlab/Simulink	24
II.5 Choix de composants	25
II.5.1 Partie puissance.....	25
II.5.2 Partie commande.....	27
II.6 Résultats de simulation	30
II.6.1 Résultats de simulation	30
II.7 Conclusion.....	36
 Chapitre III : Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques	
III.1 Introduction	37
III.2 Principe du MPPT	37
III.3 Méthode perturbation et observation (P&O).....	38
III.4 Implémentation de l’algorithme P&O sous la variation d’éclairement	41
III.5 Méthode d’incrémentatation de la conductance (IncCond)	43
III.6 Implémentation de l’algorithme (IncCond) sous la variation d’éclairement	46
III.7 Approches pour la conception d'un émulateur PV	47
III.8 Simulation d’un émulateur GPV avec variation d’irradiation	48
III.9 Résultats finals	49
III.10 Conclusion.....	51
Conclusion générale	52
Références bibliographiques	53

Liste des figures

Figure I. 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	4
Figure I. 2 Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM...	5
Figure I. 3 Exemple de cellule et de module photovoltaïque en silicium a) Plaquettes sans connectique, b) Cellule PV élémentaire, c) Générateur photovoltaïque, d) Photo d'un générateur PV poly-cristallin commercial	6
Figure I. 4 Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I. 5 Cellule photovoltaïque multi jonction crédit	7
Figure I. 6 Cellule photovoltaïque monocristalline.....	8
Figure I. 7 Cellule photovoltaïque poly cristalline.....	9
Figure I. 8 Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS).....	9
Figure I. 9 Cellule photovoltaïque amorphe.....	10
Figure I. 10 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	12
Figure I. 11 Caractéristique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	13
Figure I. 12 Caractéristique courant-tension (I-V) du module	15
Figure I. 13 Caractéristique puissance-tension (P-V) du module.....	15
Figure I. 14 Caractéristiques Courant-Tension $I=f(V)$ pour différents éclairagements et une température $T=25C^{\circ}$	16
Figure I. 15 Caractéristiques Puissance-Tension $P=f(V)$ pour différents éclairagements et une température $T=25C^{\circ}$	16
Figure I. 16 Caractéristiques Courant-Tension $I=f(V)$ pour différents températures et un éclairement $1000W/m^2$	17
Figure I. 17 Caractéristiques Puissance-Tension $P=f(V)$ pour différents températures et un éclairement $1000W/m^2$	18
Figure I. 18 (a) Schéma de connexion des modules solaires en série et parallèle.(b) Groupement des modules.....	19

Figure II. 1	Schéma électrique d'un hacheur Buck.....	21
Figure II. 2	Schéma électrique d'un hacheur Boost.....	22
Figure II. 3	Schéma électrique d'un hacheur Buck sous matlab.	25
Figure II. 4	Schéma électrique d'un hacheur Boost sous matlab.	25
Figure II. 5	Diode RHRG30120	26
Figure II. 6	MOSFET IRFP260N (Annexe 2).....	26
Figure II. 7	Photographie de l'ARDUINO UNO	28
Figure II. 8	logiciel Arduino (IDE)	29
Figure II. 9	Interface de commande	29
Figure II. 10	(a) Capteur de courant (b) Capteur de tension	30
Figure II. 11	Tensions et Courants du hacheur Buck, D=25	31
Figure II. 12	Tensions et Courants du hacheur Buck, D=50	31
Figure II. 13	Tensions et Courants du hacheur Buck, D=75	32
Figure II. 14	Tensions et Courants du hacheur Buck, D=99	32
Figure II. 15	Tensions et Courants du hacheur Boost, D=20	34
Figure II. 16	Tensions et Courants du hacheur Boost, D=30	34
Figure II. 17	Tensions et Courants du hacheur Boost, D=50	35
Figure II. 18	Tensions et Courants du hacheur Boost, D=60	35
Figure III. 1	Schéma de base d'une alimentation utilisant des panneaux solaires	38
Figure III. 2	Caractéristique puissance–tension d'un panneau photovoltaïque.	39
Figure III. 3	Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation	40
Figure III. 4	Schéma équivalent de system photovoltaïque dans l'espace Proteus plus la Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost.	42
Figure III. 5	Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost pour différent éclairément.	42
Figure III. 6	Evolution du PPM.....	44
Figure III. 7	Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.	45

Figure III. 8 Schéma équivalent de system photovoltaïque dans l'espace Proteus plus la Résultats de l'application de la méthode IncCond sur hacheur Boost.....	46
Figure III. 9 Résultats de l'application de la méthode (IncCond) sur hacheur Boost	47
Figure III. 10 Schéma équivalent d'un émulateur GPV dans l'espace Proteus	49
Figure III. 11 Résultats d'un émulateur GPV pour différent éclairement.....	49
Figure III. 12 Schéma équivalent d'un émulateur GPV dans l'espace Proteus plus la Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost	50
Figure III. 13 Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost pour différent éclairement avec l'émulateur GPV	50

Liste des tableaux

Tableau 1-1 les différents types des cellules avec leur rendement.	11
Tableau 2-2 Spécifications techniques de l'ARDUINO UNO	27

LISTE DES ABREVIATIONS

GPV : générateur photovoltaïque.

CIS: Cuivre-Indium-Sélénium.

AM: Air Mass.

I_{cc} : courant de court-circuit.

PWM (MLI):Pulse-Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion).

MPPT: Maximum Power Point Tracking (dispositif de poursuite du point de puissance Maximale).

N_p : le nombre des cellules associées en parallèle.

N_s : le nombre des cellules associées en série.

DC : Direct current

R_p : Résistance parallèle.

R_s : Résistance série. (Ohm)

P_m : Puissance maximale. (W)

I_{ph} : photo courant. (A).

PPM : Point de Puissance Maximale.

P&O: Perturbe& Observe.

IncCond : Incrémentation de la Conductance

S.T.C: Standard Test Conditions).

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

R_{sh} : Résistance shunt du générateur solaire.

Introduction générale

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui atteint la maturité technologique, son exploitation technique est relativement non polluante pour l'environnement, une source inépuisable, surabondante et gratuite, semble très prometteuse, disponible dans tous les pays et chaque jour, solution potentielle aux problèmes écologiques [11].

L'exploitation de l'énergie photovoltaïque pour la production de l'électricité représente un intérêt non négligeable, l'Algérie par exemple, à l'instar des pays en voie de développement, est confrontée au problème d'alimentation électrique des zones isolées et montagneuses. L'application des systèmes photovoltaïques apparaît comme une alternative prometteuse, car notre pays bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire et elle dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importantes [11].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [12].

Les modules photovoltaïques ont un point de fonctionnement de puissance maximale MPP qui dépend des conditions environnantes comme l'intensité de la lumière, la température du module photovoltaïque, la surface des cellules photovoltaïques et la charge [13].

Pour exploiter le maximum de l'énergie solaire, la puissance de sortie d'un système photovoltaïque doit être maximisée soit par l'amélioration des performances des équipements de conditionnement de puissance utilisés [13] ou bien par incorporation d'un dispositif électronique, entre le générateur PV et la charge, qui est un convertisseur DC-

DC. Ce dernier est commandé par son rapport cyclique par un autre dispositif de poursuite du MPP qui est appelé le contrôleur MPPT [12].

Le document présenté est rédigé en trois chapitres principaux résumés dans ce qui suit :

Dans le premier chapitre, on va faire une description générale sur les différents composants d'un système photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la description et la modélisation des convertisseurs DC-DC (hacheurs), et sa partie commande (ARDUINO UNO) avec simulation en utilisant MATLAB/SIMULINK.

Nous allons appliquer dans le dernier chapitre, la technique de poursuite MPPT. Les principes de base et l'algorithme de la méthode P&O et la méthode d'incrément de la conductance (IncCond) sont expliqués respectivement. Comme nous présenterons les simulations de la commande MPPT.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés.

Chapitre I : Généralités sur les panneaux photovoltaïques

I.1 Introduction

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 (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [01].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur l'effet photovoltaïque et son principe, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et ses performances ainsi celles d'un générateur solaire photovoltaïque GPV et leurs domaines d'applications [02].

I.2 Le rayonnement solaire

I.2.1 Le spectre solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m^2 . La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus

d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith)[03].

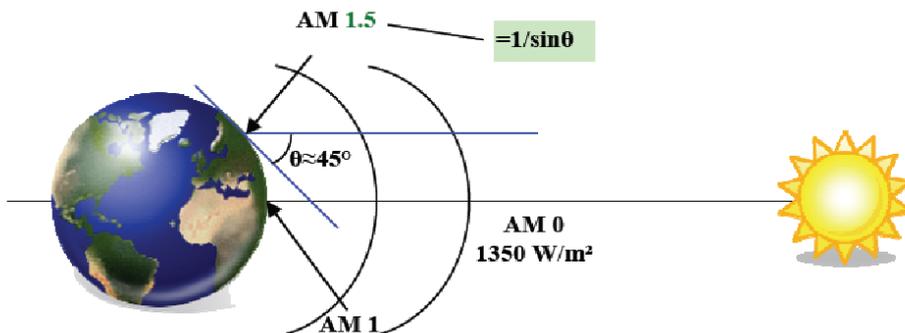


Figure I. 1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [03]

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

Normalisation : Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont un spectre AM1.5 sous un éclairage de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions). La figure (I. 1) correspondant à nos latitudes.

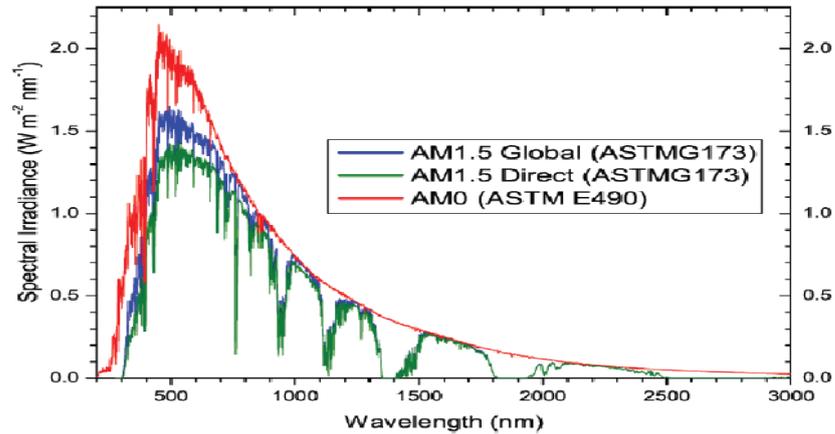


Figure I. 2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM [04]

I.2.2 La durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée [04].

I.3 Les cellules photovoltaïques

Une cellule PV est constituée de deux couches de silicium ; ces deux couches sont dopées afin d'être polarisées, pour rendre l'une des couches positive « couche P » on lui incorpore un certain nombre d'atomes de bore, et pour rendre l'autre couche négative « couche N » on lui incorpore un certain nombre d'atomes de phosphore, on crée ainsi une barrière de potentiel, lorsqu'un photon ayant suffisamment d'énergie est absorbé par ce semi-conducteur, il produit la rupture d'une liaison de valence et libère ainsi un électron,

ce qui crée un « trou » positif, c'est ce que l'on appelle l'effet photovoltaïque : c'est la différence de potentiel entre ces deux couches. En reliant les deux couches on obtient un mouvement d'électrons qui passent d'une couche à l'autre, et crée ainsi un courant électrique [04].

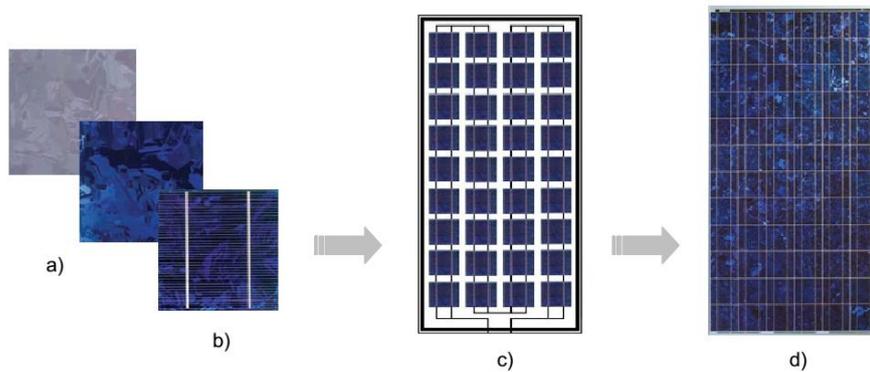


Figure I. 3 : Exemple de cellule et de module photovoltaïque en silicium [06]

a) Plaquettes sans connectique, **b)** Cellule PV élémentaire, **c)** Générateur photovoltaïque, **d)** Photo d'un générateur PV poly-cristallin commercial

I.3.1 Effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de Deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [05].

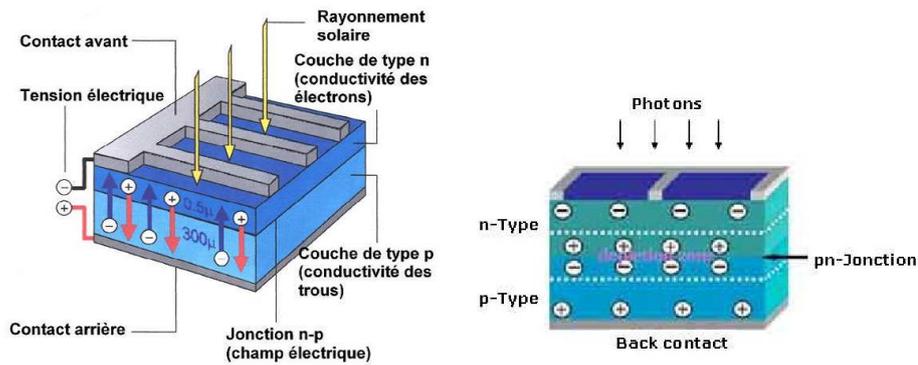


Figure I. 4 : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque [12]

I.3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques

➤ Cellule Multi jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion (figure I. 5) [15].

- **Avantage :**
 - Rendement inégalé
- **Inconvénients :**
 - Pas d'application commerciale

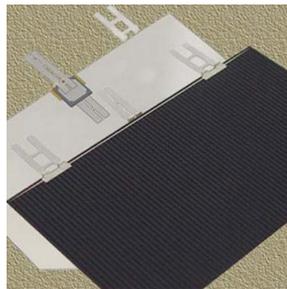


Figure I. 5 : Cellule photovoltaïque multi jonction crédit [15]

➤ Cellule en silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement matériau la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le

terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [01].

- **Avantage :**
 - Très bon rendement (environ 150 Wc/m²)
 - Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- **Inconvénients :**
 - Coût élevé
 - Rendement faible sous un faible éclaircissement

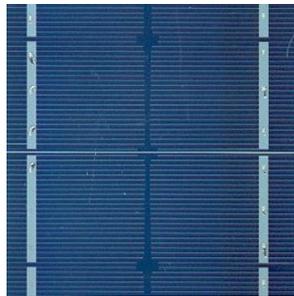


Figure I. 6 : Cellule photovoltaïque monocristalline [01]

➤ **Cellule en silicium poly cristallin**

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule[01].

- **Avantage :**
 - Bon rendement (environ 100 Wc/m²)
 - Durée de vie importante (+/- 30 ans)
 - Meilleur marché que le monocristallin
- **Inconvénients :**
 - Rendement faible sous un faible éclaircissement

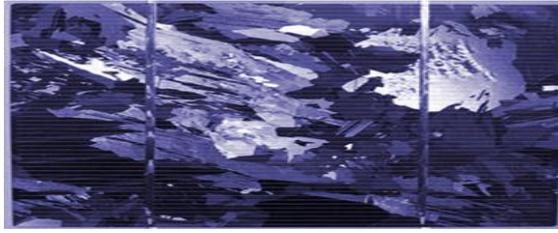


Figure I. 7 : Cellule photovoltaïque poly cristalline [01]

➤ **Cellule sans silicium en couche mince CIS**

Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince (figure I.8) [15].

• **Avantage :**

- Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- Permet de s'affranchir du silicium
- Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible

• **Inconvénients :**

- Les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses

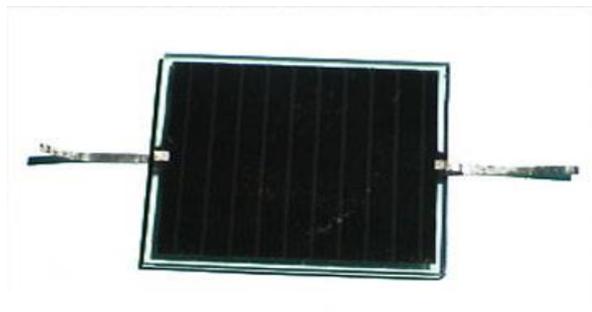


Figure I. 8 : Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS) [15]

➤ Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron [01].

• **Avantage :**

- Fonctionnent avec un éclairage faible
- Souplesse Prix moins élevé que les cristallins
- Moins sensible aux températures élevées

• **Inconvénients :**

- Mauvais rendement en plein soleil
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps



Figure I. 9 : Cellule photovoltaïque amorphe [01]

I.3.3 Rendement de conversion des cellules photovoltaïques

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement incident [16]:

$$\eta = \frac{V * I}{G * \sigma} \quad (1)$$

Avec σ : Surface de la cellule PV, G : Éclairement

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement [15]:

Tableau 1-1 : les différents types des cellules avec leur rendement [15]

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Cellule Multi jonction	environ 40%	Pas d'application commerciale
Cellule en silicium monocristallin	environ 25%	12 à 20%
Cellule en silicium poly cristallin	environ 20%	11 à 15%
Cellule sans silicium en couche mince CIS	environ 19,3%	9 à 11%
Cellule silicium amorphe en couche mince	environ 13,4%	5 à 9%

I.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.10) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série (R_s), et résistance parallèle (R_{sh}) ou (R_p).

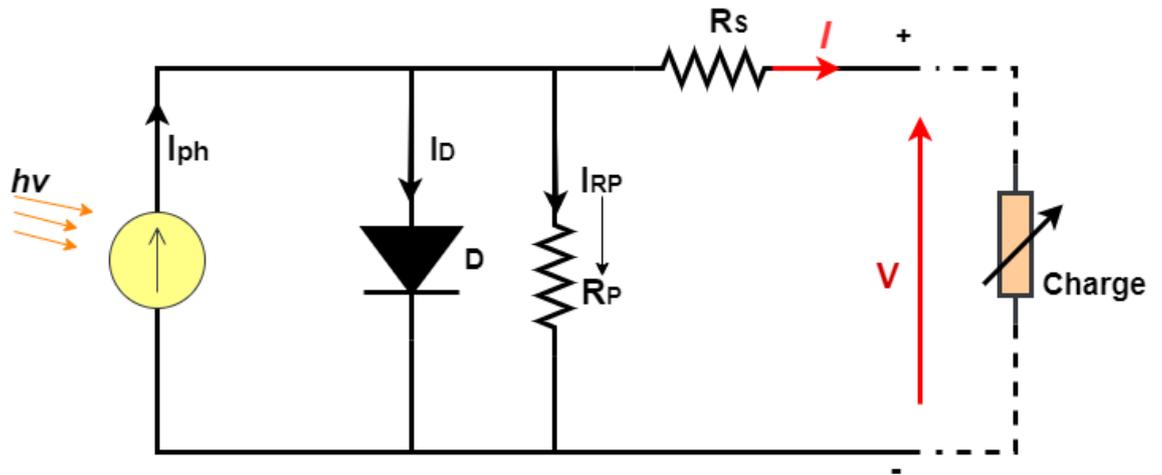


Figure I. 10 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [06]

L'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'une cellule est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V + I * R_s}{AVT}} - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (2)$$

$$\text{Avec } I_{ph} = I_{ph,STC} \frac{G}{G_{STC}} [1 + \alpha_1 (T - T_{STC})] \quad (3)$$

$$\text{Et } V_T = \frac{KT}{q} \quad (4)$$

Où :

$I_{ph} (A)$: La photo courant crée par la cellule dépendant de l'ensoleillement G (W/m^2) et de la température T ($^{\circ}K$).

α_1 : Le coefficient de température de I_{ph} .

$I_{sat} (A)$: Courant de saturation de la diode.

A : Le facteur de non idéalité de la jonction.

$V_T (A)$: La potentielle thermodynamique.

$k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$: Constante de Boltzmann.

$q = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$: Charge de l'électron.

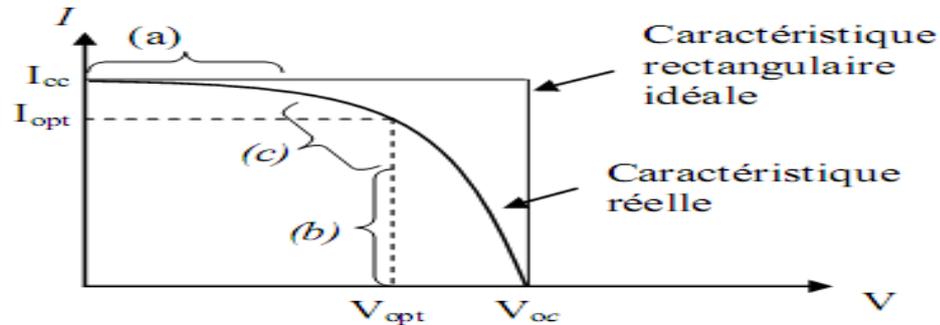


Figure I. 11 : Caractéristique équivalente d'une cellule photovoltaïque réelle [06]

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement

a-Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

L'expression suivante exprimée le courant de court-circuit I_{cc} :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{q(R_s * I_{cc})}{AKT}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

I_{cc} : courant de court-circuit.

I_{ph} : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement.

I_{sat} : courant de saturation.

A : le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

R_s : résistance série du générateur solaire.

R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire.

A un niveau d'éclairement standard (égale à 1 kW/m²), l'effet de la résistance série est négligeable. Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement Φ

$$I_{cc} = I_{ph} = C\Phi \quad (6)$$

Où :

C : Constante. , Φ : Flux solaire [06].

-Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{co} .

-Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} et un V_{co} désirés [02].

I.5 Caractéristique Courant-Tension d'un Générateur photovoltaïque

La figure (I.12) représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25C.

La figure (I.13) représente la courbe $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque dans des conditions standard d'irradiation et de température.

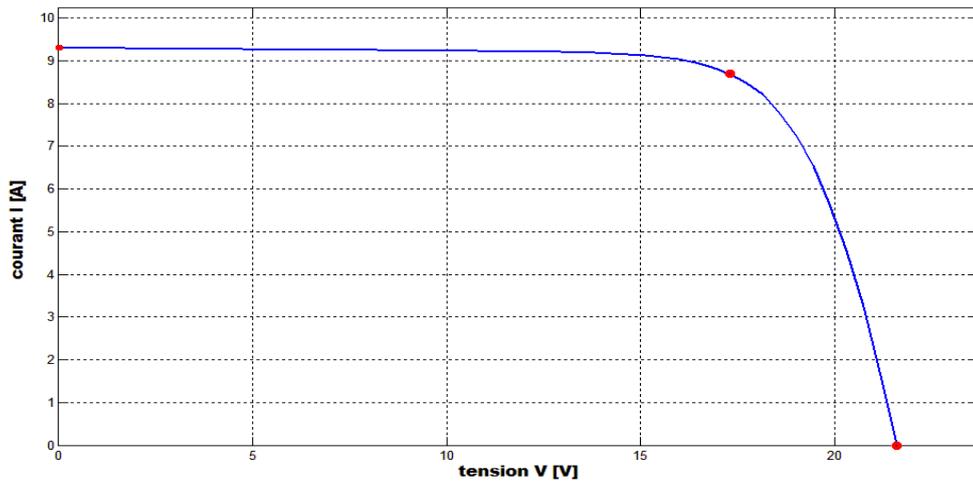


Figure I. 12 : Caractéristique courant-tension (I-V) du module

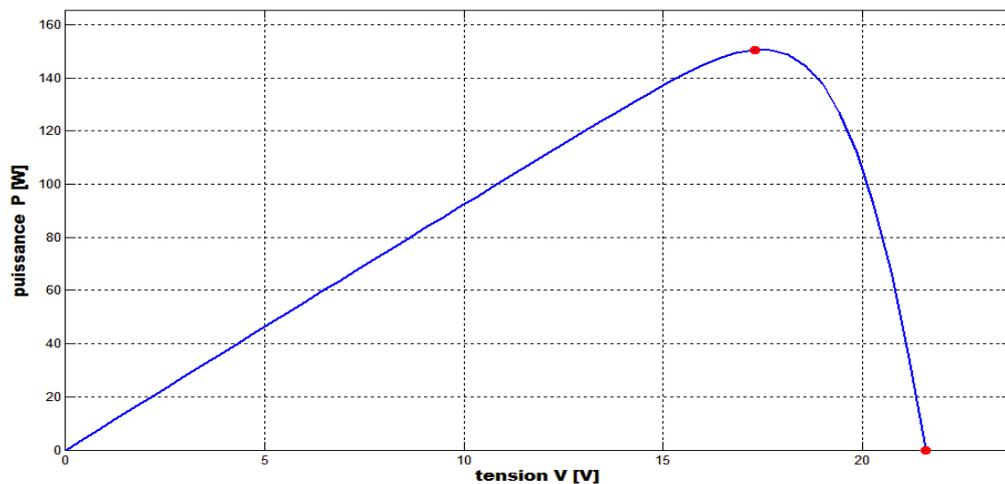


Figure I. 13 : Caractéristique puissance-tension (P-V) du module

I.5.1 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La figure (I. 14) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par

contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [2, 5].

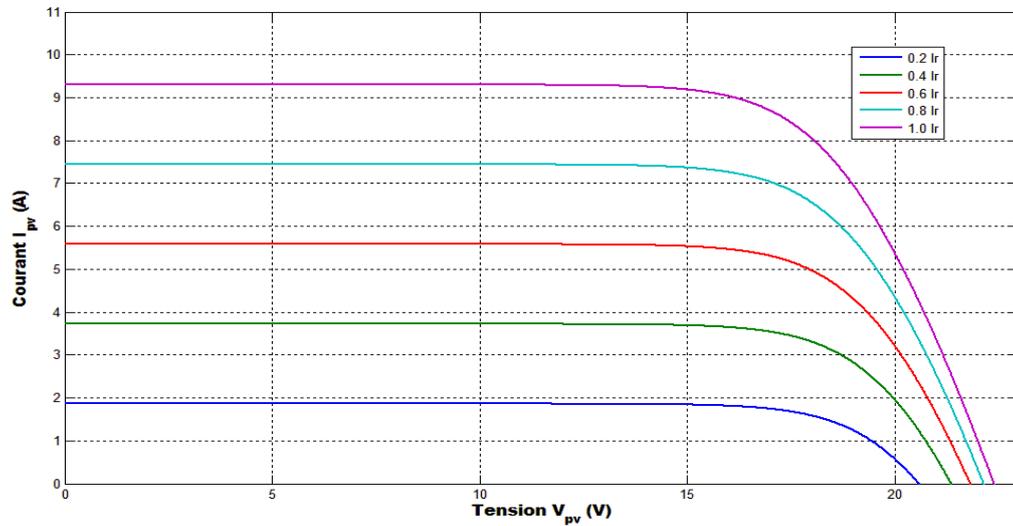


Figure I.14 : Caractéristiques Courant-Tension $I=f(V)$ pour différents éclairements et une température $T=25^\circ\text{C}$ (I_r : irradiation)

La figure (I.15) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

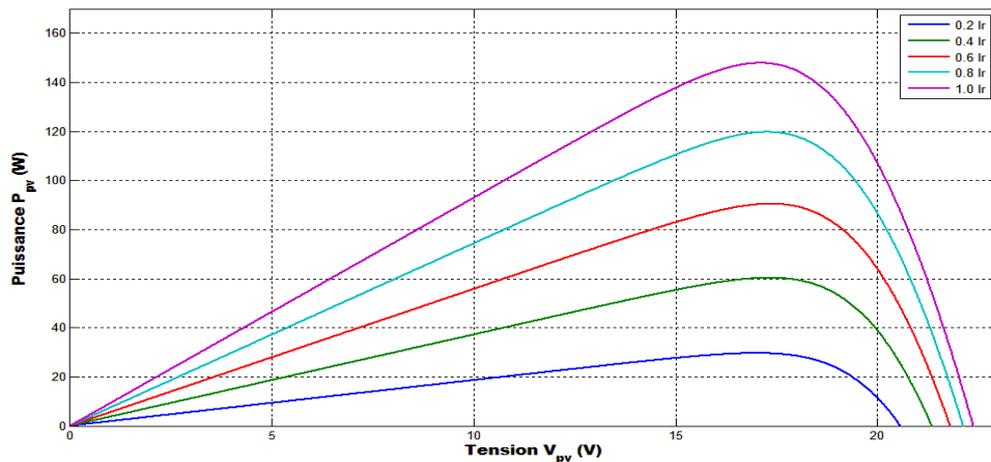


Figure I.15 : Caractéristiques Puissance-Tension $P=f(V)$ pour différents éclairements et une température $T=25^\circ\text{C}$ (I_r : irradiation)

La figure (I.16) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [07].

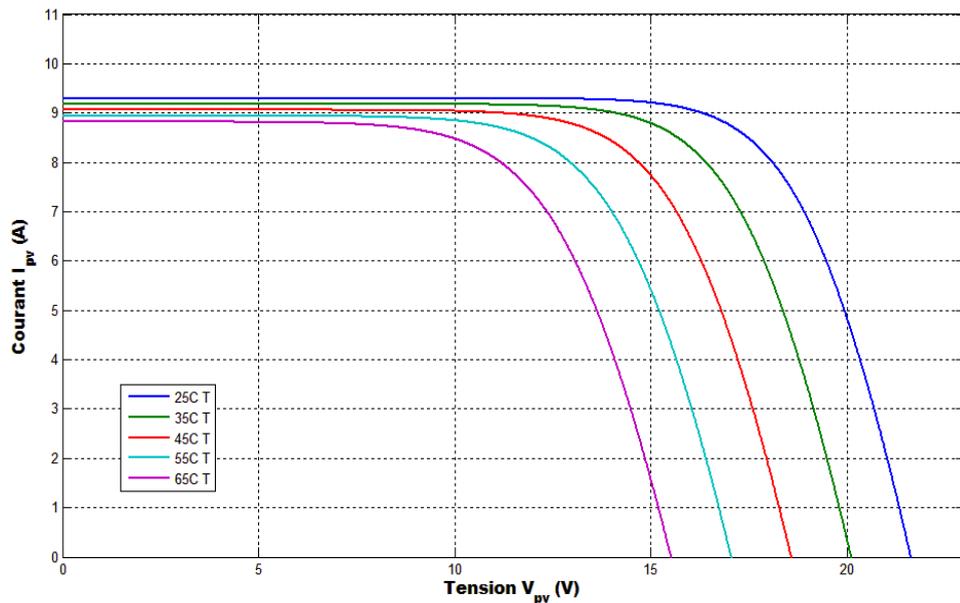


Figure I.16 : Caractéristiques Courant-Tension $I=f(V)$ pour différents températures et un éclairement $1000\text{W}/\text{m}^2$

La figure (I. 17) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [07].

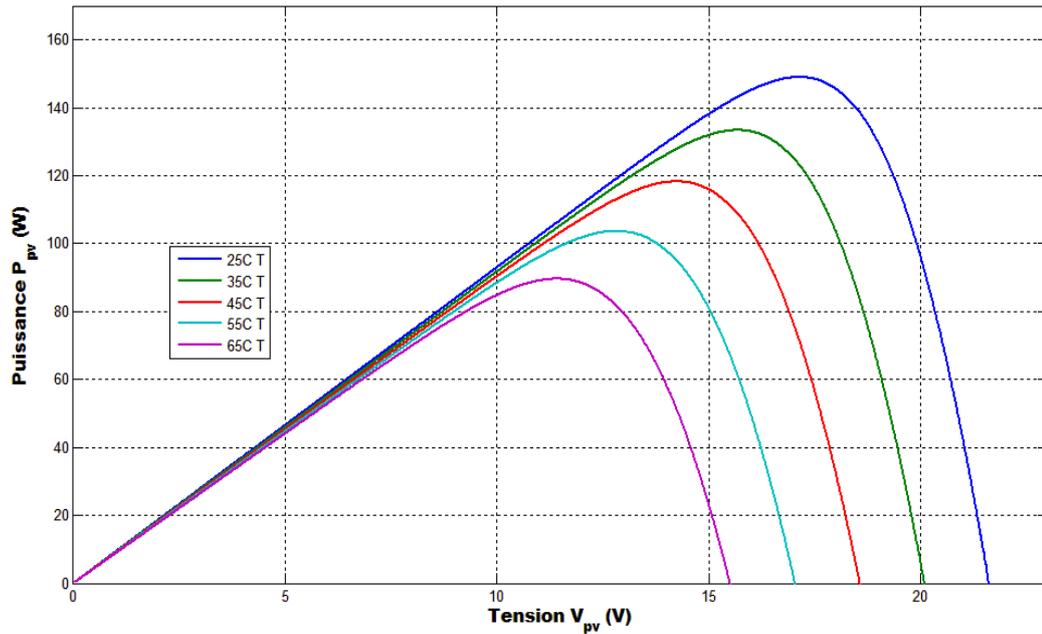
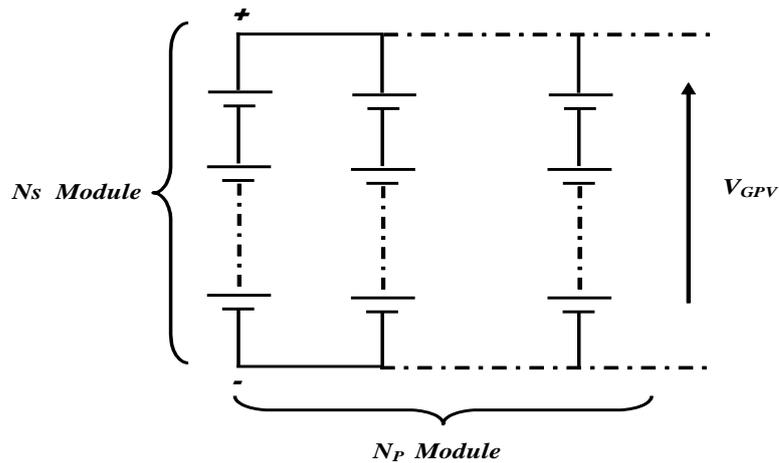


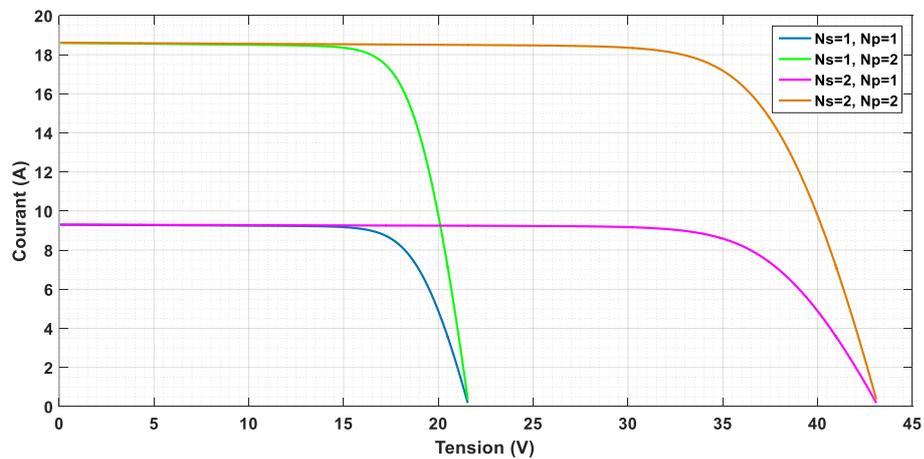
Figure I. 17 : Caractéristiques Puissance-Tension $P=f(V)$ pour différents températures et un éclairement $1000W/m^2$

I.5.2 L'association en parallèle, série, mixte des modules :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous (figures I. 1 : a,b), ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Comme il est montré par la figure, ce genre de groupement augmente le courant ; la caractéristique équivalente sera alors celle d'une cellule. Afin d'obtenir des puissances de quelques KW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [13].



(a)



(b)

Figure I. 18 : (a) Schéma de connexion des modules solaires en série et parallèle.

(b) Groupement des modules [13].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque, l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Les résultats de simulations présentés nous ont montré que les variations de la température et du rayonnement influent fortement sur le rendement du module PV.

Chapitre II : Les Convertisseur DC/DC (Les hacheurs)

II.1 Introduction

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [07].

Le but de ce chapitre est l'étude des quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

II.2 Etude théorique

Dans cette partie nous présentons le principe des deux types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités.

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la Puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande Souplesse et un rendement élevé [07].

II.2.1 Hacheur dévolteur «Buck »

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur(S) à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et en série avec la source, et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à DT, avec D: est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1. Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de DT à T [17].

Son schéma de principe est présenté sur la figure (II.1)

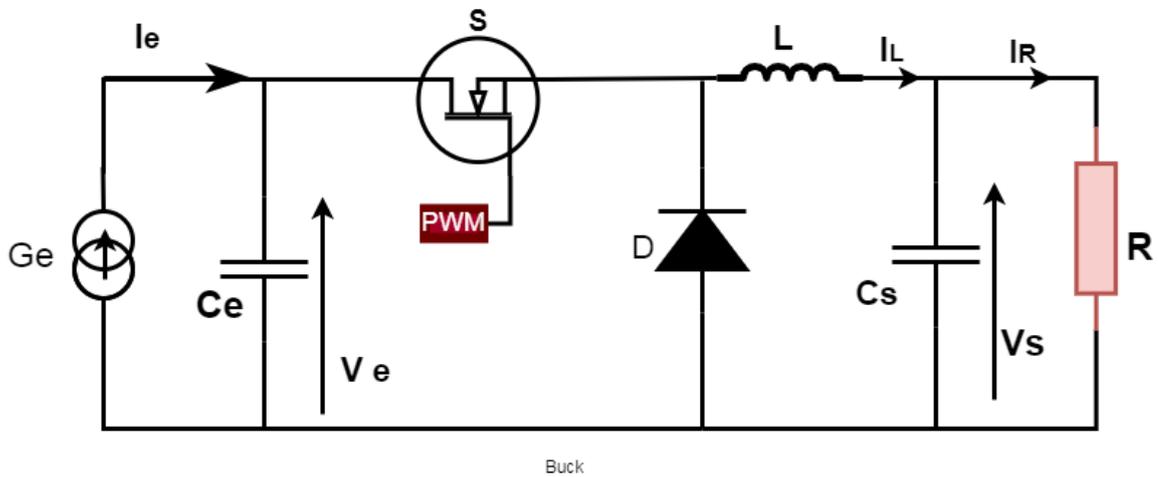


Figure II. 1 : Schéma électrique d'un hacheur Buck

Le système des équations du hacheur Buck est donnée par :

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_s + D * V_e \quad (07)$$

$$C_s \frac{dV_s}{dt} = i_L - \frac{V_s}{R} \quad (08)$$

$$C_e \cdot \frac{dV_e}{dt} = i_e - D \cdot i_L \quad (09)$$

II.2.2 Hacheur survolteur «Boost »

Le convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle. Il est utilisé pour convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [18].

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source. Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance R pendant une durée $tf = DT$ bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance [17].

Son schéma de principe est présenté sur la figure (II. 2)

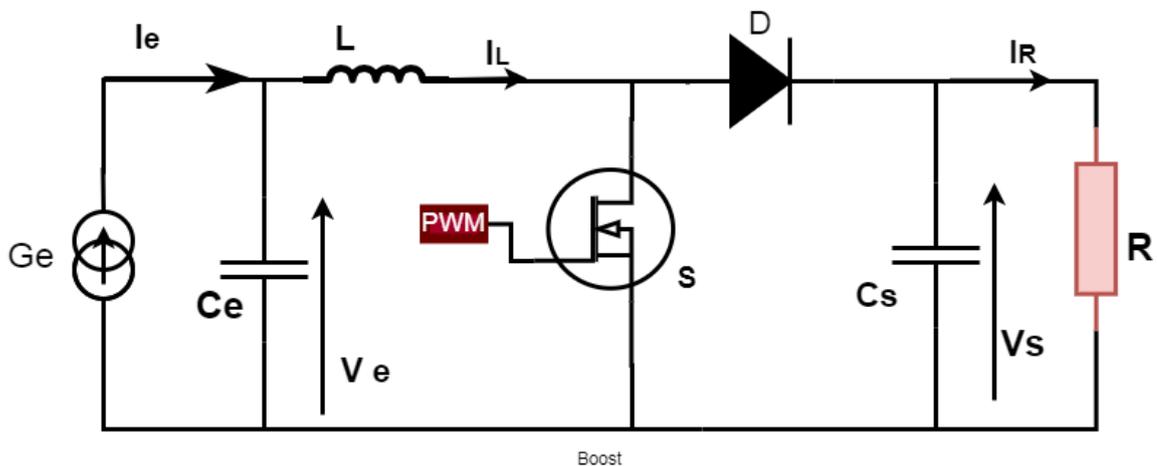


Figure II. 2 : Schéma électrique d'un hacheur Boost

Le système des équations du hacheur Boost est donnée par :

$$L \frac{di_L}{dt} = -(1 - D) * V_s + V_e \quad (10)$$

$$C_s \frac{dV_s}{dt} = (1 - D)i_L - \frac{V_s}{R} \quad (11)$$

$$C_e \frac{dV_e}{dt} = i_e - i_L \quad (12)$$

II.3 Dimensionnement des Hacheurs

II.3.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons voir comment choisir les éléments qui permettent de constituer et d'assurer le fonctionnement du système. Pour dimensionner les composants d'un convertisseur, il faut connaître la puissance d'entrée et la puissance de sortie souhaitée, le courant d'entrée et le courant de sortie, ainsi que la tension d'entrée.

$$P_e = \text{Puissance d'entrée} = 800\text{W}$$

$$P_s = \text{Puissance de sortie} = 800\text{W}$$

$$V_e = \text{Tension d'entrée} = \text{entre } 0 \text{ et } 100\text{V}$$

$$D \text{ entre } 5\% \text{ et } 95\%$$

$$V_s = \text{entre } 100\text{V} \text{ et } 200\text{V}.$$

II.3.2 Dimensionnement de l'inductance

Le calcul de l'inductance débute par le calcul du courant d'entrée maximal.

On impose la fréquence de découpage en haute fréquence (20 kHz) et on vérifie si l'ondulation de courant est correcte en basse fréquence (20 kHz).

Calcul du courant d'entrée

$$I_e = \frac{P_e}{V_e} = \frac{800}{100} = 8\text{A} \quad (13)$$

Calcul du courant de sortie.

$$I_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{800}{200} = 4\text{A} \quad (14)$$

$\Delta I_L = 20\%$ Afin de diminuer les pertes par hystérésis [22].

$$\Delta I_L = 0.2 * I_s * \frac{V_s}{V_e} = 0.2 * 4 * 2 = 1.6\text{A} \quad (15)$$

On dimensionne L ainsi

$$L = \frac{V_e \cdot (V_s - V_e)}{\Delta I_L \cdot f \cdot V_s} = \frac{100 \cdot (200 - 100)}{1.6 \cdot 20000 \cdot 200} = 1.5625mH \quad (16)$$

Après calcul, la self utilisée doit être au minimum 1.5625 mH, l'inductance peut se trouver dans le marché ou bien être fabriquée, dans notre cas on a utilisé une bobine de 0.25mH qui est la seule bobine qui existe.

II.3.3 Dimensionnement du condensateur

On admet une ondulation de tension ΔV_s

$$\Delta V_s = \frac{V_s}{I_s} \left(\frac{I_s}{1 - D_{\min}} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) = \frac{200}{4} \left(\frac{4}{1 - 0.05} + \frac{0.2}{2} \right) = 215V \quad (17)$$

On dimensionne C ainsi [22]:

$$C = \frac{I_s \cdot D_{\min}}{\Delta V_s \cdot f} = \frac{4 \cdot 0.05}{215 \cdot 20000} = 465 \mu F \quad (18)$$

Après calcul, le condensateur utilisé doit être au minimum 465 μF .

Un condensateur de sortie de 560 μF 200V suffit pour obtenir une tension de sortie continue acceptable.

Un condensateur de filtrage (560 μF 200V) placé en parallèle avec la source afin d'assurer l'équilibrage des tensions.

II.4 Simulation sous Matlab/Simulink

Les logiciels de simulation sont des outils puissants qui testent et évaluent l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécutions du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlables. La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être fait facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variation et de choisir enfin la solution optimale [23].

Dans cette partie, la simulation des hacheurs est faite en utilisant Matlab (figures II. 3, II. 4).

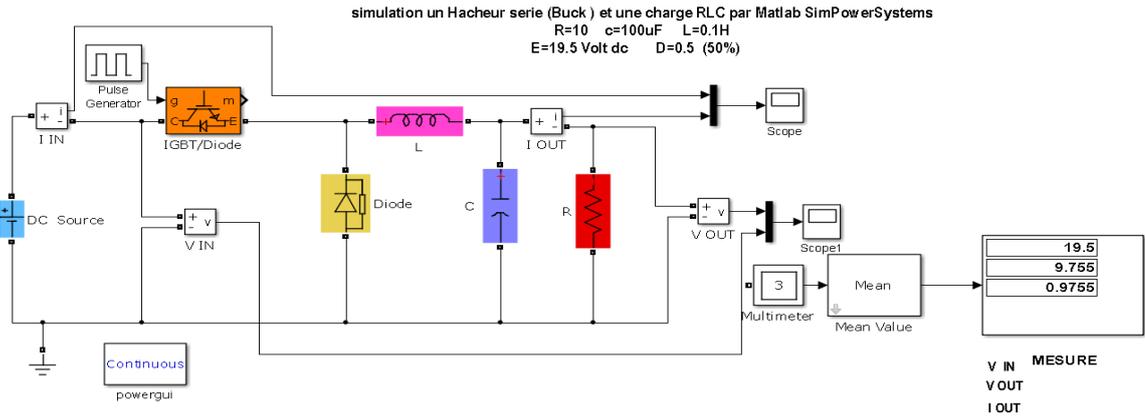


Figure II. 3 : Schéma électrique d'un hacheur Buck sous matlab.

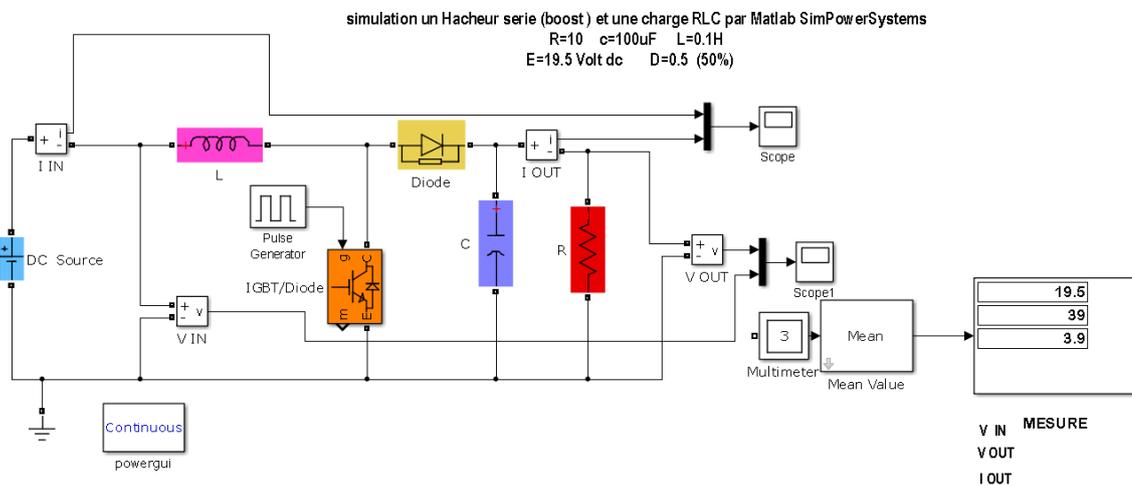


Figure II. 4 : Schéma électrique d'un hacheur Boost sous matlab.

II.5 Choix de composants

II.5.1 Partie puissance

II.5.1.1 Choix de la diode

La diode utilisée doit être extrêmement rapide. Les pertes par recouvrements inverses sont générées par ses diodes, en conséquence, plus elles seront bonne, moins il y aura de pertes. Notre choix s'est porté sur des diodes RHRG 30120.

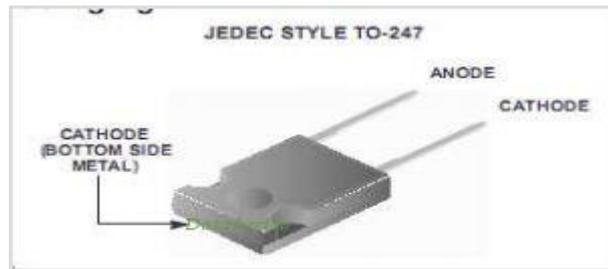


Figure II. 5 : Diode RHRG30120

II.5.1.2 Choix du MOSFET

Le transistor choisi doit pouvoir supporter à ses bornes la tension qui va lui être imposée, et doit également fonctionner à la fréquence désirée. Une des raisons d'avoir choisi un MOSFET est sa fréquence de fonctionnement qui dépasse les 100kHz. Le MOSFET choisi est l'IRFP 260 N. Le courant de drain maximal est de 50A, sa tension maximale est de 200V et enfin sa résistance à l'état passant $R_{DS(on)}$ est de 0.04 Ohms typique.

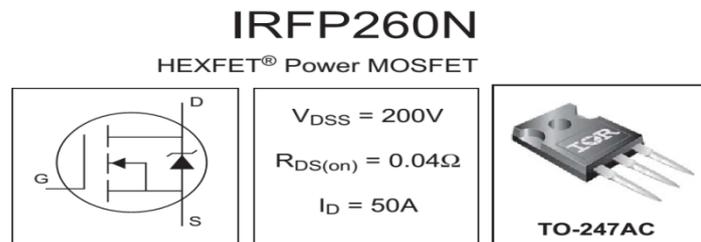


Figure II. 6 : MOSFET IRFP260N

Après le dimensionnement et la simulation des deux hacheurs on a besoin les différents composants suivants :

1. Diode RHRG30120
2. Transistor MOSFET IRFP260N
3. Condensateur de sortie ($560\mu F$)
4. Condensateur d'entrée ($560\mu F$)
5. Bobine ($0.25mH$)
6. Connexion charge
7. Connexion entrées de puissance

8. Conecteur (Arrivé MLI (PWM))

II.5.2 Partie commande

II.5.2.1 Arduino

Arduino est une plate-forme électronique open-source basée sur un matériel et un logiciel faciles à utiliser. Les cartes Arduino peuvent lire des entrées - lumière sur un capteur, un doigt sur un bouton - et le transformer en sortie - activer un moteur, allumer une LED. Vous pouvez indiquer à votre conseil d'administration ce qu'il faut faire en envoyant un ensemble d'instructions au microcontrôleur sur le tableau. Pour ce faire, vous utilisez le langage de programmation Arduino (basé sur le câblage) et le logiciel Arduino (IDE), basé sur le traitement [21].

Grâce à son expérience utilisateur simple et accessible, Arduino a été utilisé dans des milliers de projets et d'applications différents. Le logiciel Arduino est facile à utiliser, mais assez flexible pour les utilisateurs avancés [21]. Dans notre travail on a utilisé l'Arduino UNO (figure II. 7) qui a les Spécifications techniques suivant :

Tableau 2-2 Spécifications techniques de l'ARDUINO UNO [19]

Microcontrôleur	ATmega328P
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'entrée (recommandée)	7-12V
Tension d'entrée (limite)	6-20V
Broches d'E / S numériques	14 (dont 6 fournissent une sortie PWM)
Broches d'entrée analogique	6
Courant continu par broche E / S	20 mA
Courant continu pour broche 3.3V	50 mA
Mémoire Flash	32 KB (ATmega328P) Dont 0,5 Ko utilisé par boot loader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Vitesse de l'horloge	16 MHz

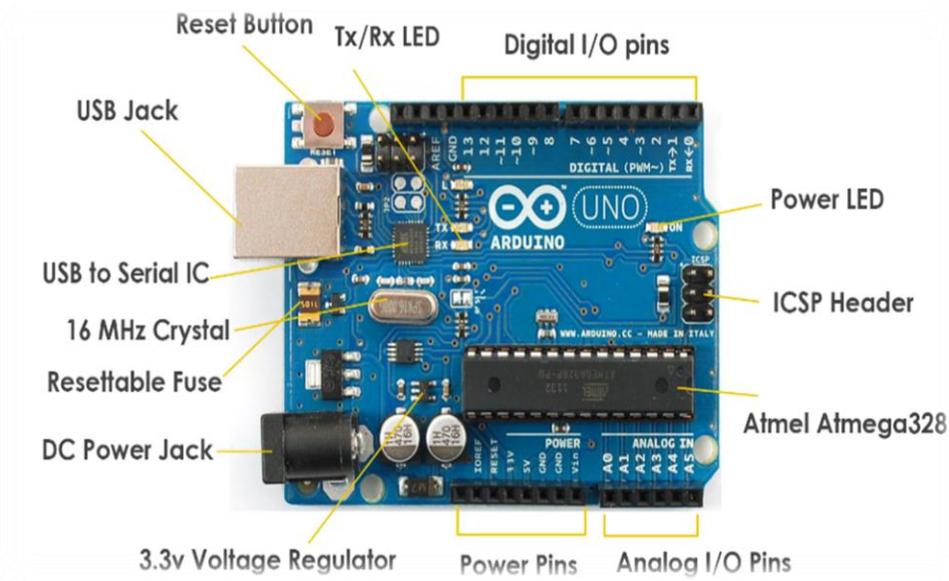


Figure II. 7 : Photographie de l'ARDUINO UNO [20]

Le logiciel open source (Windows, linux ou mac) fourni avec l'Arduino est un éditeur de texte qui permet de programmer la carte en utilisant un langage simple proche du C [21].

A l'ouverture, l'interface visuelle du logiciel représenté sur la figure (II. 8) suivante:

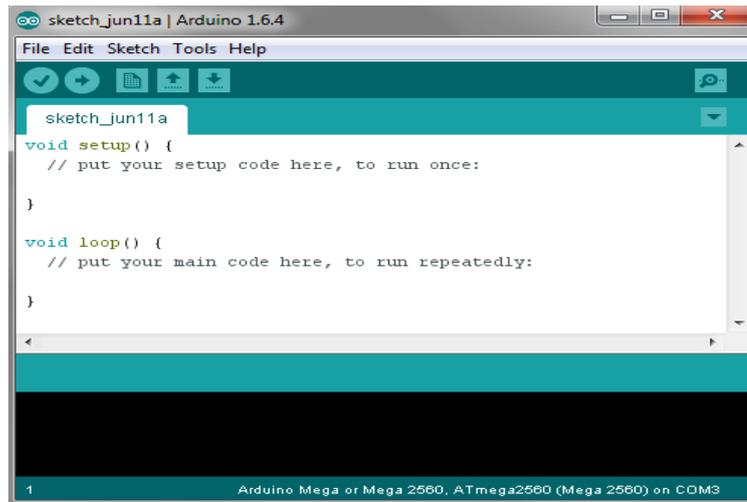


Figure II. 8 : logiciel Arduino (IDE)

II.5.2.2 Interface de commande

Pour aider à la commutation du transistor (MOSFET) étant donnée de l'énergie importante à transférer, des circuits intégrés existent. Il s'agit du Interface de commande. Ils se connectent aux gâchettes des MOSFET et envoie une tension suffisamment important pour assurer la commutation d'un état ouvert/fermé à un état fermé/ouvert.

Le circuit de commande se compose de :

- Opto-coupleur A3120 (isolation galvanique pour la protection).

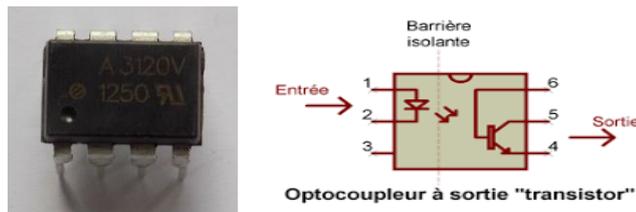


Figure II. 9 : Interface de commande [10]

II.5.2.3 Mesures

Pour mesurer les tensions et les courants lors du test des hacheurs et le panneau solaire on a utilisé des capteurs compatibles avec ARDUINO qui sont présenté dans la Figure (II. 10).

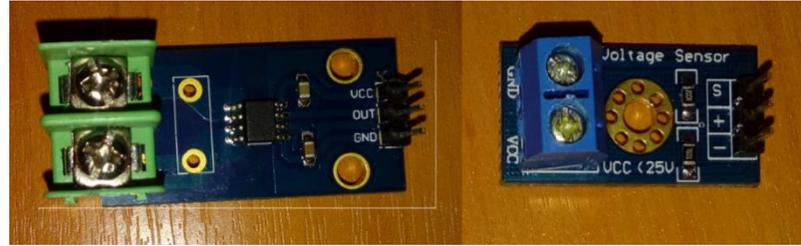


Figure II. 10 : (a) Capteur de courant (b) Capteur de tension

II.6 Résultats de simulation

Dans cette partie, en premier lieu nous présentons les résultats de simulation des hacheurs alimentés par une tension continue et commandés par différentes valeurs du rapport cyclique.

II.6.1 Résultats de simulation

II.6.1.1 Buck

Les figures (II.11, II.12, II.13, II.14) montrent les tensions et les courants d'entrées / sorties pour différentes valeurs du rapport cyclique (25%, 50%, 75%, 99%).

On remarque que :

- L'augmentation du rapport cyclique D entraîne une augmentation de la tension de sortie qui est toujours inférieure à la tension d'entrée.
- Pour $D=50\%$, $V_{s,theorique} = D * V_e = 0.5 * 19.5 = 9.75V$ et d'après la figure (II. 11)
- $V_{s,mesuré} = 9.96V$ Ce résultat confirme la relation (19) entre la tension d'entrée et la tension de sortie $V_S = D * V_e$ (19)
- Le courant de sortie est supérieur au courant d'entrée.

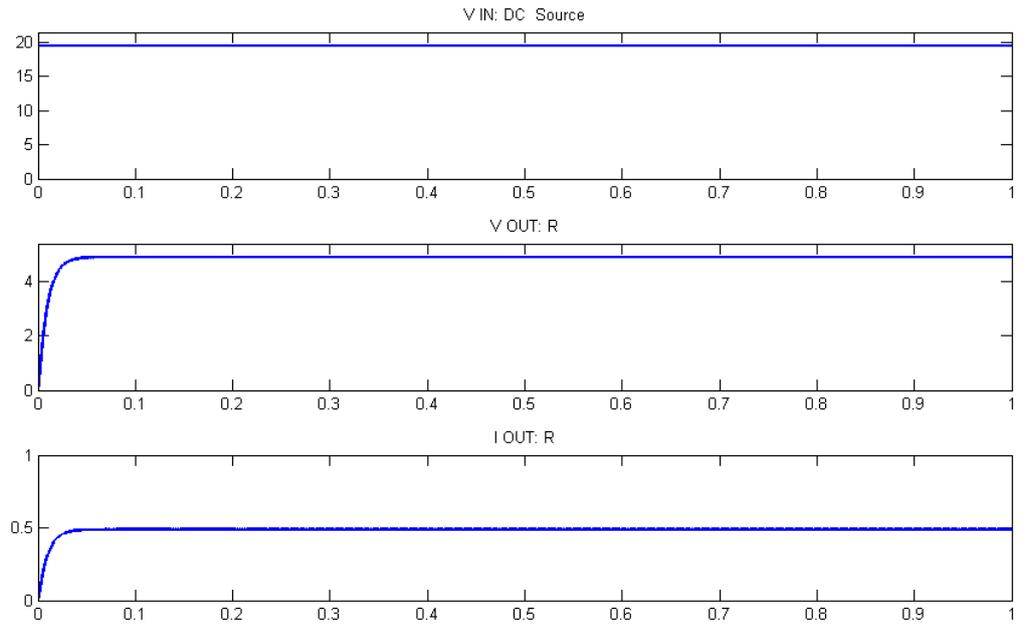


Figure II. 11 : Tensions et Courants du hacheur Buck, $D=0.25\%$

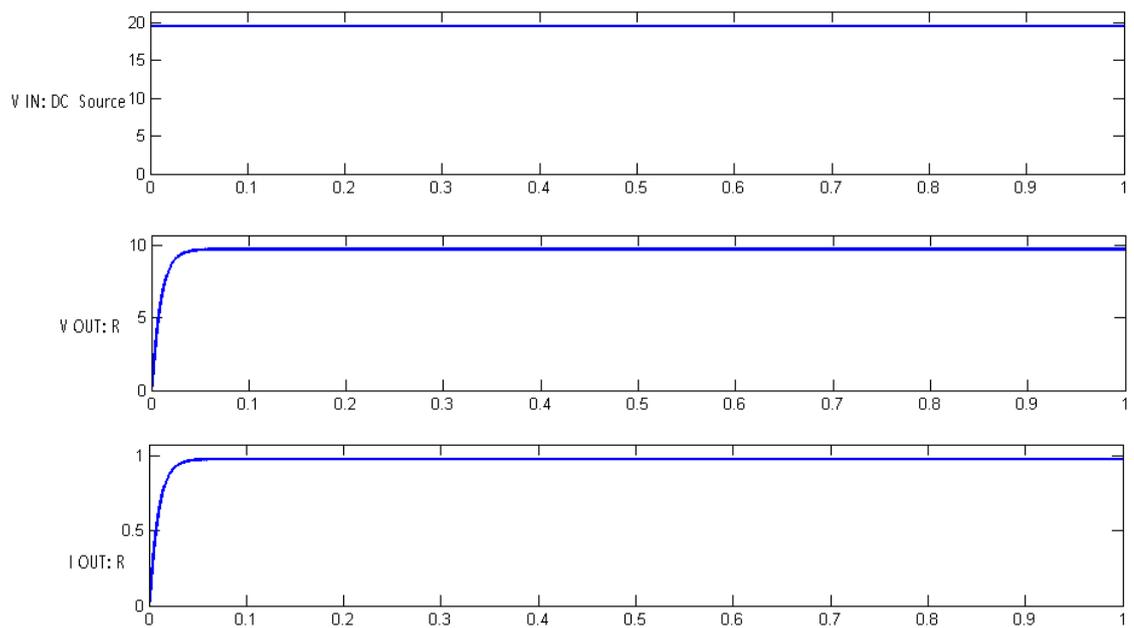


Figure II.12 : Tensions et Courants du hacheur Buck, $D=50\%$

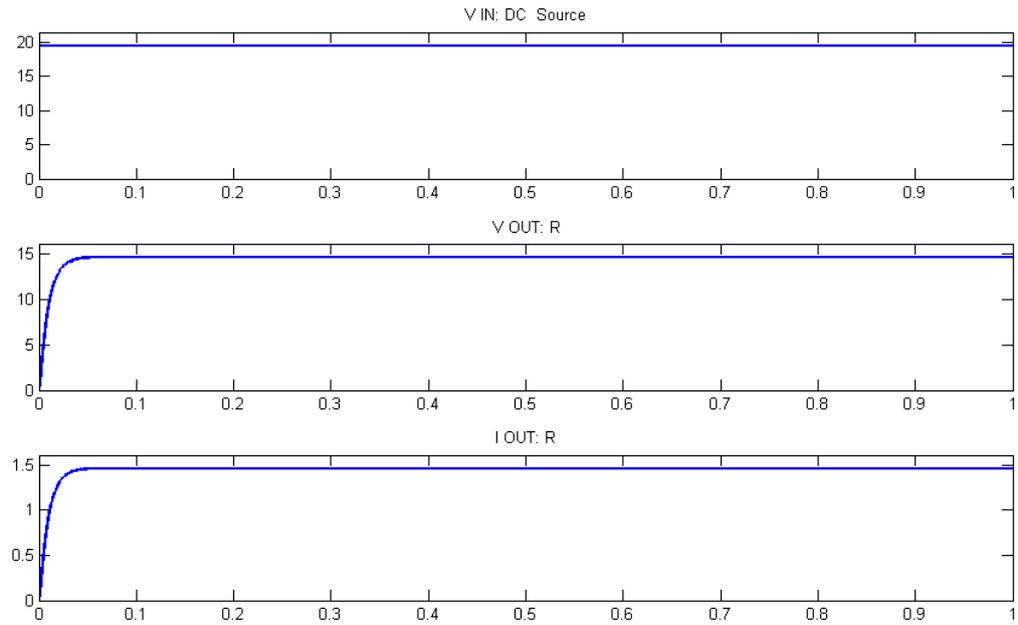


Figure II. 13 : Tensions et Courants du hacheur Buck, $D=75\%$

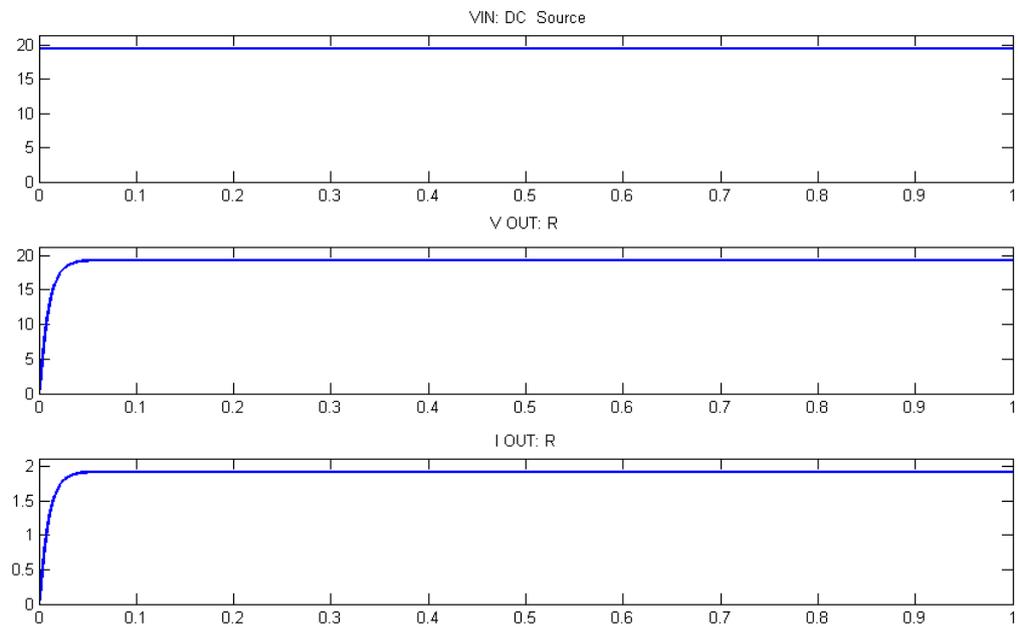


Figure II. 14 : Tensions et Courants du hacheur Buck, $D=99\%$

II.6.2.2 Boost

Les figures (II.15, II.16, II.17, II.18) présentent les tensions et les courants d'entrées / sorties pour différentes valeurs du rapport cyclique (20%, 30%, 50%, 60%).

On remarque que :

- L'augmentation du rapport cyclique D entraîne une augmentation de la tension de sortie qui est toujours supérieur à la tension d'entrée.

- Pour $D=30\%$,
$$V_{s,théorique} = \frac{1}{1-D} * V_e = \frac{1}{1-0.3} * 19.5 = 28.21V$$

et d'après la figure (II. 12)

- $V_{s,mesuré} = 28.4V$ Ce résultat confirme la relation (20) entre la tension d'entrée et la

tension de sortie
$$V_s = \frac{1}{1-D} * V_e \quad (20)$$

- Le courant de sortie est inférieur au courant d'entrée.

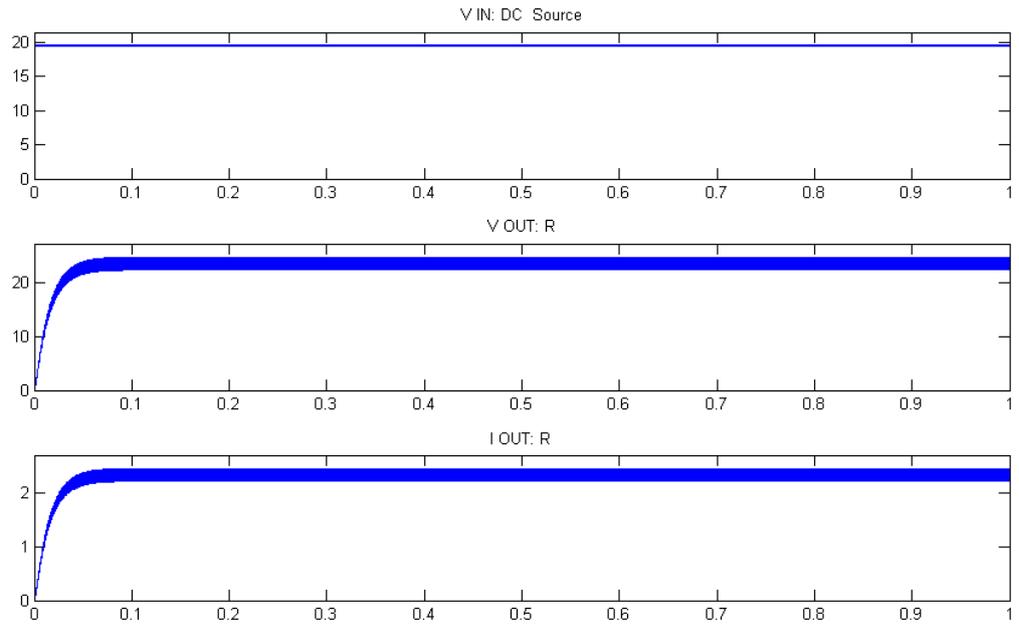


Figure II. 15 : Tensions et Courants du hacheur Boost, $D=20\%$

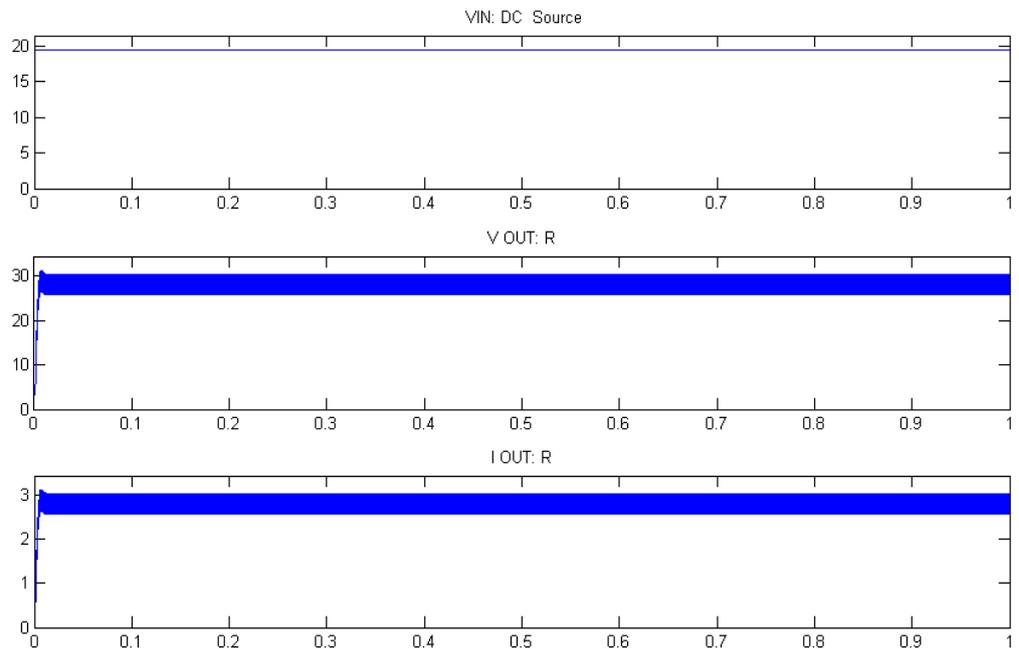


Figure II. 16 : Tensions et Courants du hacheur Boost, $D=30\%$

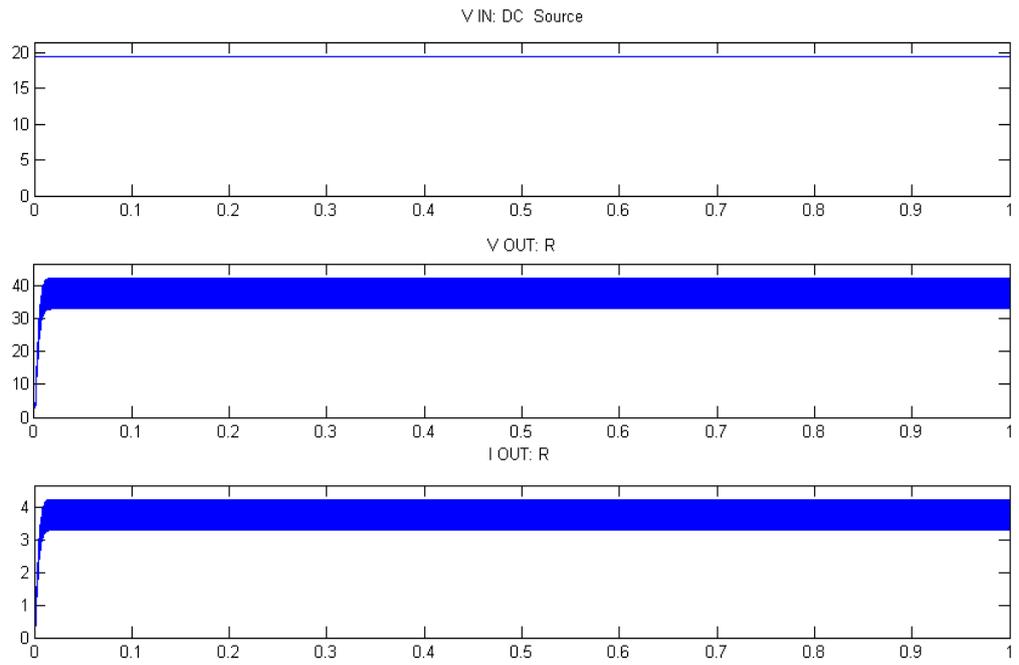


Figure II. 17 : Tensions et Courants du hacheur Boost, $D=50\%$

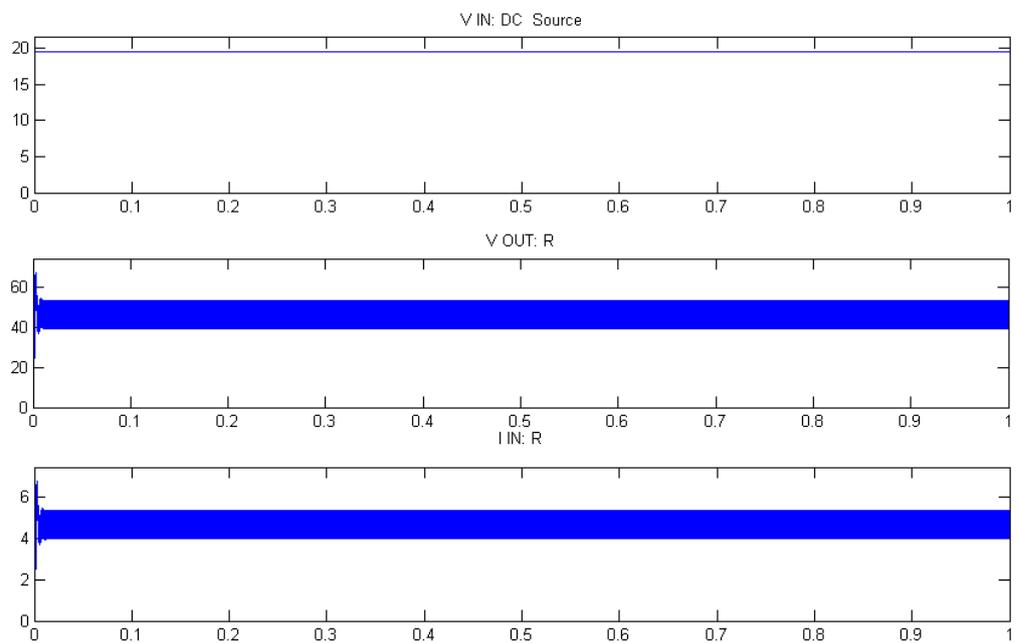


Figure II. 18 : Tensions et Courants du hacheur Boost, $D=60\%$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes notions qui entrent dans la modélisation, le dimensionnement et la simulation des convertisseurs DC/DC.

Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs buck et boost pour objectif de les utiliser dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques

III.1 Introduction

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courant. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairement). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Alors, une commande pour la poursuite du PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT, peut être plus ou moins compliquée. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM. Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Beaucoup de chercheurs s'intéressent au rappel et à la comparaison des différentes techniques MPPT qui existent dans la littérature [08].

III.2 Principe du MPPT

La chaîne de puissance d'un générateur photovoltaïque (GPV) où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure (III. 1). La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le P_{MAX} (V_{MPP} , I_{MPP}) disponible à ses bornes quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement) [08]. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur statique (I_{pv} et V_{pv}) [09].

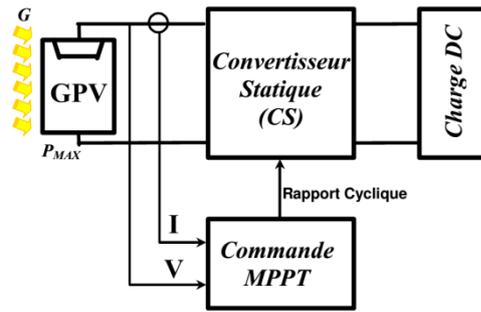


Figure III. 1 : Schéma de base d'une alimentation utilisant des panneaux solaires [09]

III.3 Méthode perturbation et observation (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus populaire dans la littérature, son principe peut être résumé comme suit : "si suite à une perturbation de tension, la puissance du GPV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM".

Cet algorithme est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de 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 comme il est indiqué par la figure (III. 2). 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. On peut donner une explication si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente, sinon, on inverse la perturbation du cycle précédent [8].

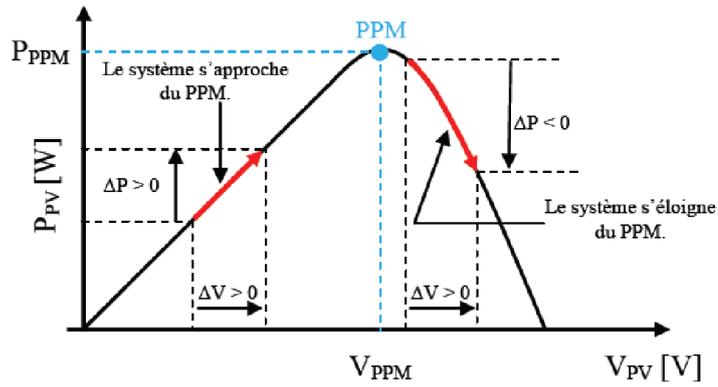


Figure III. 2 : Caractéristique puissance –tension d’un panneau photovoltaïque [10].

Premièrement, la tension V_{pv} et le courant I_{pv} sont mesurés pour calculer la puissance $P_{pv}(K)$.

Cette valeur $P_{pv}(K)$ est comparée avec la valeur de puissance obtenue durant la dernière $P_{pv}(k - 1)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmentée depuis la dernière mesure, l’incrément de tension V_{ref} continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et cela est fait par le test sur ΔV_{PV} .

Si $\Delta V_{PV} > 0$ cela veut dire qu’on a incrémenté V_{ref} durant le dernier cycle c’est-à-dire.

$$V_{ref}(K + 1) = V_{ref}(K) + \Delta V \quad (21)$$

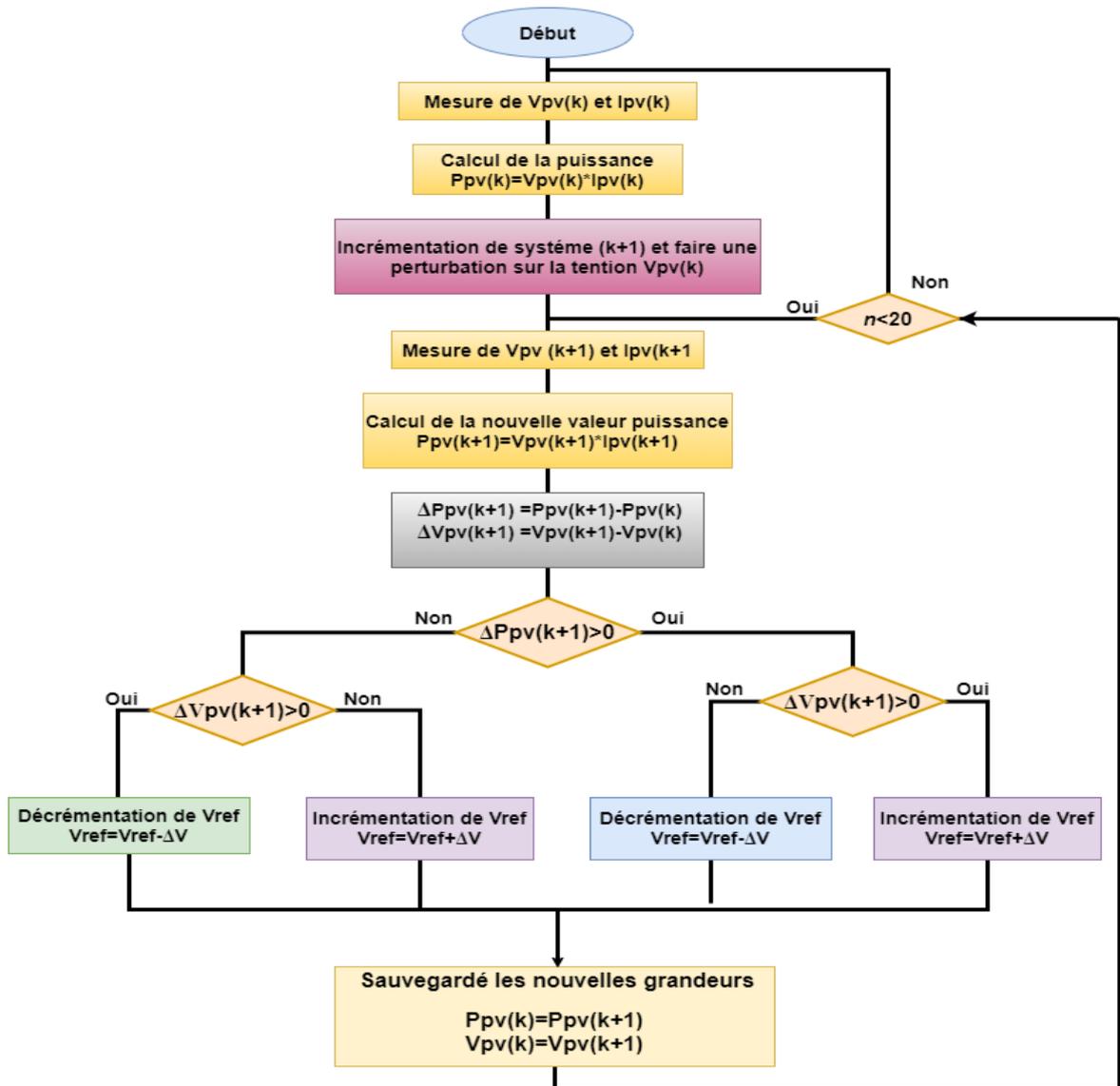


Figure III. 3 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation [02]

Si $\Delta V_{pv} < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V_{pv} durant le dernier cycle c'est-à-

dire qu'on va mettre $V_{ref}(K+1) = V_{ref}(K) - \Delta V$ (22)

donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure ,l'incrémentement ou la

décrémentement de la tension de référence V_{ref} sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et cela est fait aussi par le test sur ΔV .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V_{ref} est perturbée avec chaque cycle. et elle oscillera autour du point de fonctionnement idéal (V_{mpp}) [02].

III.4 Implémentation de l'algorithme P&O sous la variation d'éclairement

Dans cette étude, la simulation est réalisée à l'aide du logiciel Proteus. La chaîne de conversion photovoltaïque a été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel Proteus. Elle est composée des blocs fonctionnels programmés et simulés qui sont:

1-« GPV », simulant le fonctionnement d'un module et/ou d'un panneau photovoltaïque de 20(W).

2-« Boost », simulant le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost.

3-« carte arduino uno », simulant la commande MPPT (P&O) appliquée au convertisseur.

4-« capteur de courant (INA 168A) (ACS712) », pour définir la valeur de courant.

5-« diviseur de tension », pour réduire la tension V_{pv} .

6-« La charge », elle est résistance est égale à 15 Ω .

On applique les opérations suivantes:

1- la température: et 25 °C.

2- Le changement de l'ensoleillement

- E=200 W/m²
- E=500 W/m²
- E=1200 W/m²

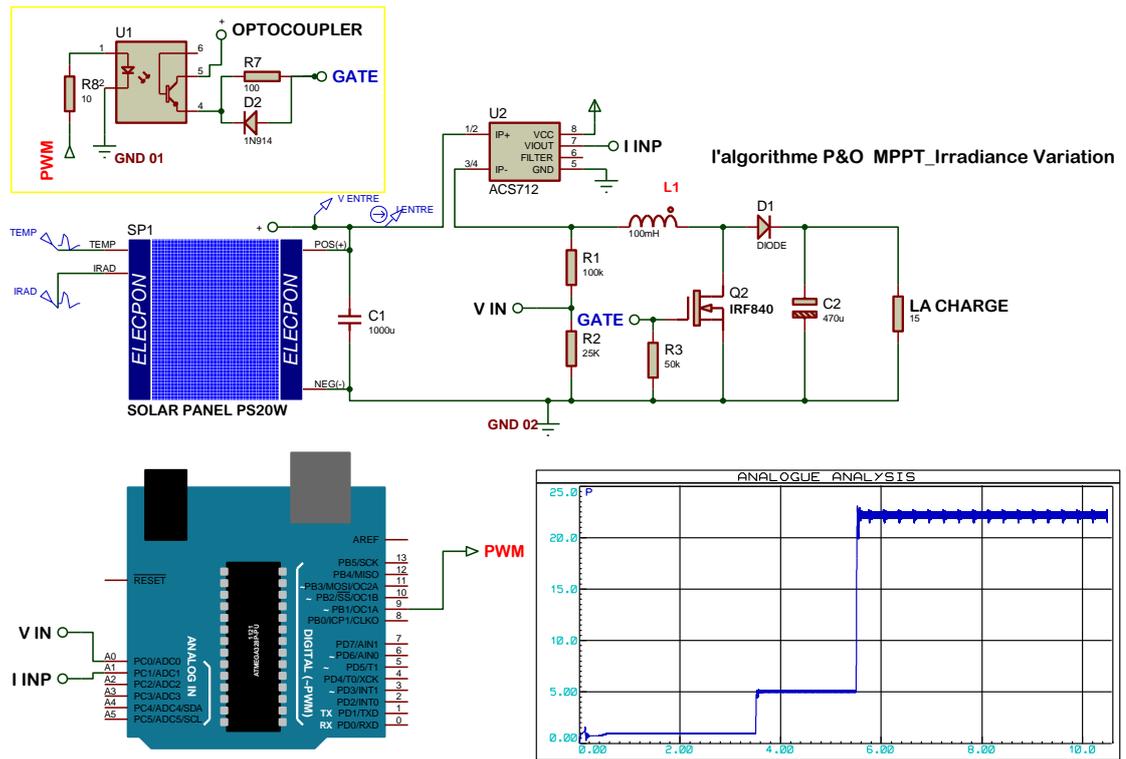


Figure III. 4 : Schéma équivalent de system photovoltaïque dans l'espace Proteus plus la Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost .

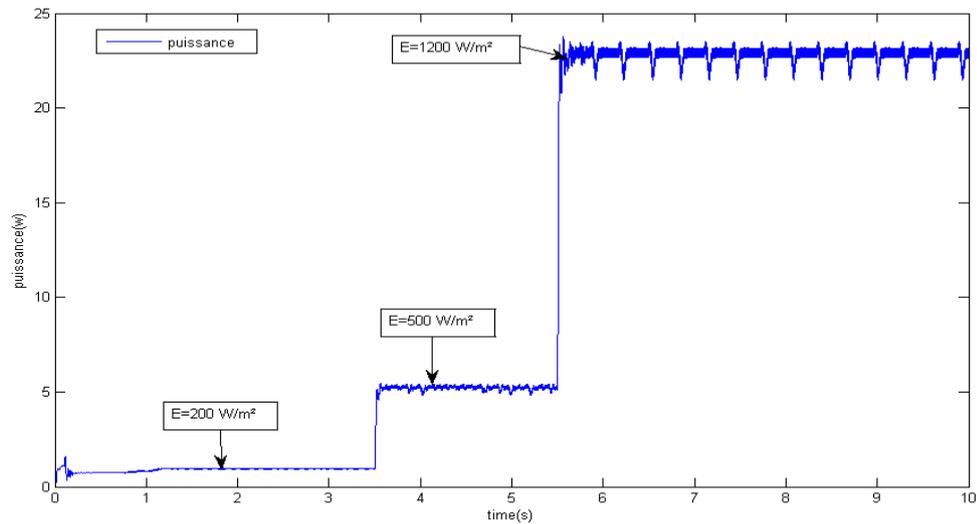


Figure III. 5 : Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost pour différent éclairément.

Les figures (III.4), (III.5) représentent la puissance du générateur photovoltaïque dans les conditions changement de l'ensoleillement, nous avons remarqué que la puissance est toujours stable en valeurs max pour différents éclairagements.

Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

III.5 Méthode d'incrémentation de la conductance (IncCond)

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de Puissance maximale (MPP) n'est atteint que si dP/dV est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure(III.6) prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant:

$$\frac{d_p}{d_t} = 0 \text{ Pour } V = V_{mp} \quad (23)$$

$$\frac{d_p}{d_t} > 0 \text{ Pour } V < V_{mp} \quad (24)$$

$$\frac{d_p}{d_t} < 0 \text{ Pour } V > V_{mp} \quad (25)$$

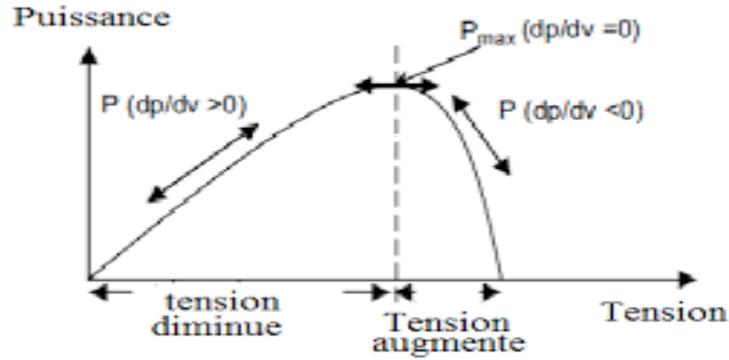


Figure III. 6 : Evolution du PPM [05]

Sachant que, $P = I * V$, la dérivée du produit par rapport à la tension donne la relation suivante:

$$\frac{d_P}{d_V} = \frac{d_{(V*I)}}{d_V} = I * \frac{d_V}{d_I} + V * \frac{d_I}{d_V} = I + V * \frac{d_I}{d_V} \quad (26)$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{d_I}{d_V} = -\frac{I}{V} \quad (27)$$

Les changements par accroissement nécessaires d_V et d_I sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour V et I à ceux mesurés durant le cycle précédent:

$$d_V(K) \approx V(K) - V(K-1) \quad (28)$$

$$d_I(K) \approx I(K) - I(K-1) \quad (29)$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes:

$$\frac{d_I}{d_V} = -\frac{I}{V} \quad (30)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \tag{31}$$

Si la relation (30) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension $V(k)$ n'est nécessaire. Si la relation (30) est fausse, selon que $V(k)$ est supérieure ou inférieure à , la tension $V(k)$ est ajustée en conséquence.

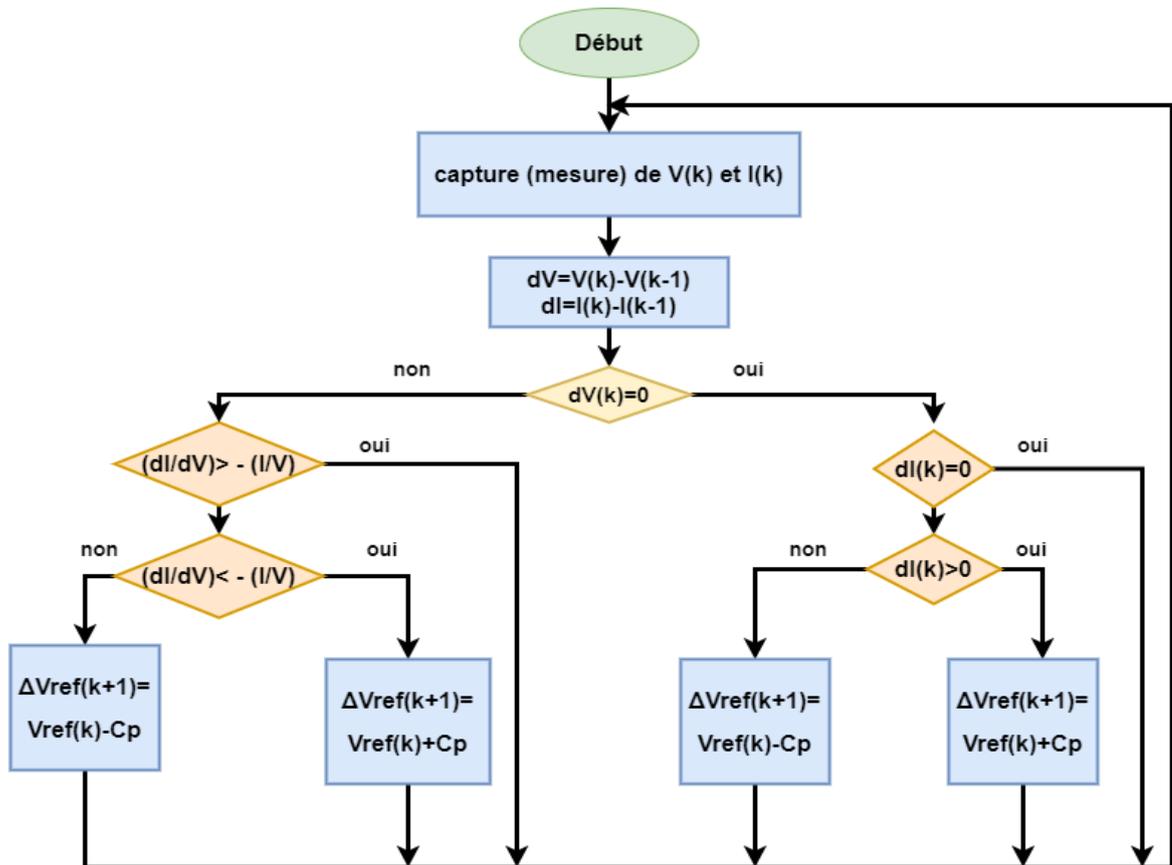


Figure III. 7 : Organigramme de l’algorithme MPPT de l’incrémentale de la conductance

[10]

Si le système fonctionnait au MPP pendant le cycle précédent, le changement par accroissement de la tension de fonctionnement sera zéro $dV(k)=0$. Ceci mènerait à une division par l’erreur zéro.

Si $dI=0$, l’ajustement de la tension du système est évité.

Si $dI \neq 0$, les équations (24) et (25) sont employées pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de et un ajustement correspondant à la tension de fonctionnement sera réalisé en conséquence [05].

On remarque que chaque méthode présentait des avantages et des inconvénients.

III.6 Implémentation de l'algorithme (IncCond) sous la variation d'éclairement

On applique les opérations suivantes:

- 1- la température : et 25 °C.
- 2- Le changement de l'ensoleillement- $E=1000 \text{ W/m}^2$ après - $E=600 \text{ W/m}^2$

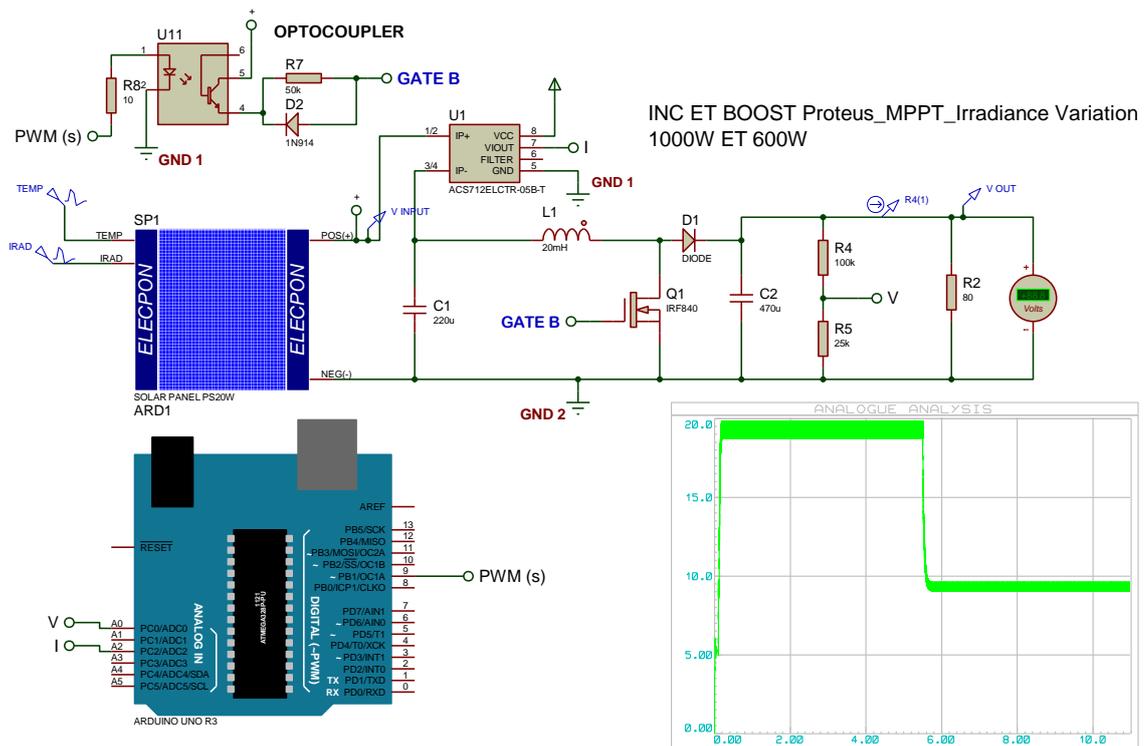


Figure III. 8 : Schéma équivalent de system photovoltaïque dans l'espace Proteus plus la Résultats de l'application de la méthode (IncCond) sur hacheur Boost

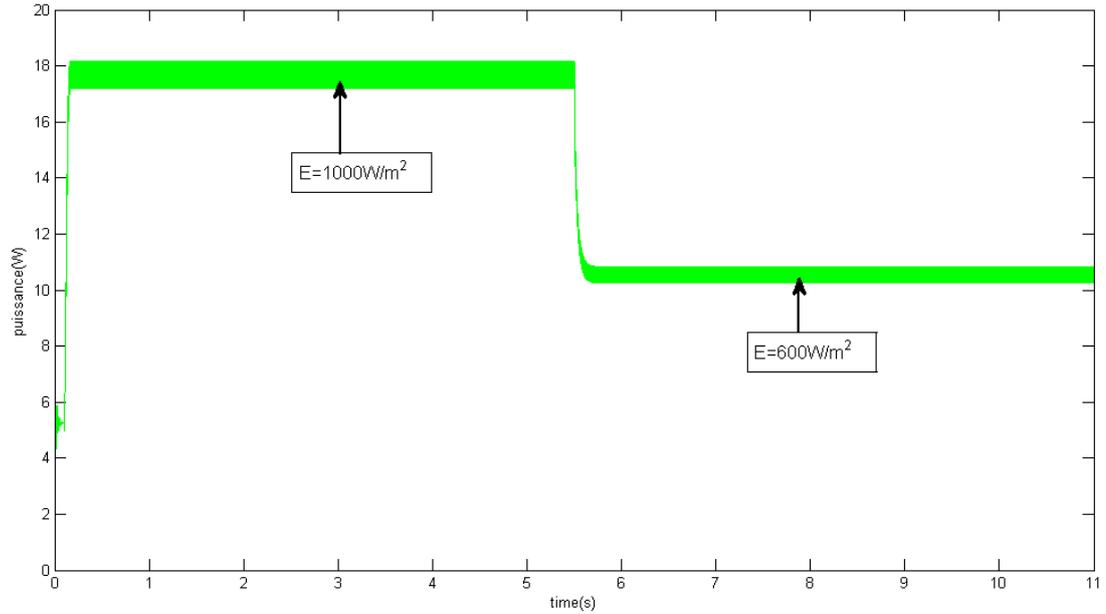


Figure III. 9 : Résultats de l'application de la méthode (IncCond) sur hacheur Boost

Par constatation des résultats obtenus, on peut remarquer que l'algorithme (IncCond) effectue un rôle très important pour commander le système PV et l'obliger de produire à chaque fois sa puissance maximale malgré les variations météorologiques (Température et éclairage) et ça ce fait juste par le contrôle continu de la variation de la puissance produite mesurant uniquement la tension et le courant photovoltaïques sans fait appel à un modèle mathématique de la source photovoltaïque.

III.7 Approches pour la conception d'un émulateur PV

Il existe trois approches largement utilisées pour concevoir un émulateur PV:

- Utilisation du circuit équivalent du générateur PV: il comprend des dispositifs de puissance, des résistances et des diodes. La performance de la diode est gravement affectée par la puissance dissipée, ce qui nécessite un système de refroidissement efficace.
- Exposer pratiquement les cellules photovoltaïques à une source de lumière dans des conditions de température et d'irradiation adéquates : il est efficace pour les faibles niveaux de puissance car des facteurs tels que la dissipation de la chaleur et la taille de la configuration de test créent des difficultés pour les applications à forte puissance.

- Utilisation des composants électroniques de puissance modernes : les alimentations sont basées sur une puissance contrôlable par convertisseur, telle que des convertisseurs DC-DC, ce qui est le moyen le plus efficace parmi toutes les approches. Les convertisseurs DC-DC ainsi que les systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisés pour éviter les pertes dues à une inadéquation de la courbe caractéristique et de la ligne de charge

Les différents convertisseurs utilisés dans les émulateurs incluent Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic, Zeta, etc. Les PWM avec P, PI, PID fonctionnent bien pour des fréquences de commutation fixes et des signaux de petite taille. Un émulateur peut reproduire rapidement différentes caractéristiques souhaitées sans coût supplémentaire en apportant simplement des modifications mineures au contrôleur. Les contrôleurs d'émulateur décrits dans la littérature incluent des contrôleurs en mode coulissant robustes en charge et offrant une meilleure réponse dynamique par rapport aux autres contrôleurs. Modes de contrôle de la tension et du courant.

Dans cette partie nous proposons un émulateur avec un hacheur buck avec et la commande de PWM Controller avec régulateur PID.

III.8 Simulation d'un émulateur GPV avec variation d'irradiation

Nous appliquons quatre niveaux d'éclairement ($E = 100\text{W/m}^2$, $E = 300\text{ W/m}^2$, $E = 600\text{ W/m}^2$, et $E = 900\text{W/m}^2$ successivement) chaque 0.13 s, tout en gardant une température constante égale à 25°C , les résultats de simulation obtenus sont présentés par la figure (III.10)

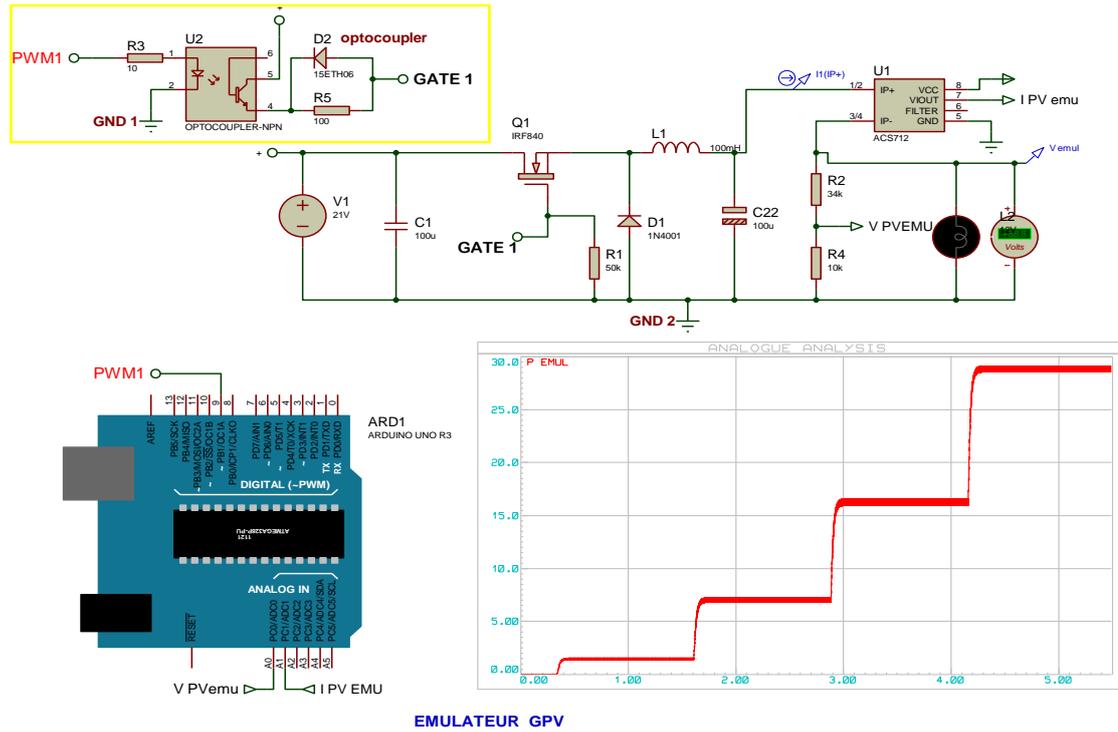


Figure III. 10 : Schéma équivalent d'un émulateur GPV dans l'espace Proteus

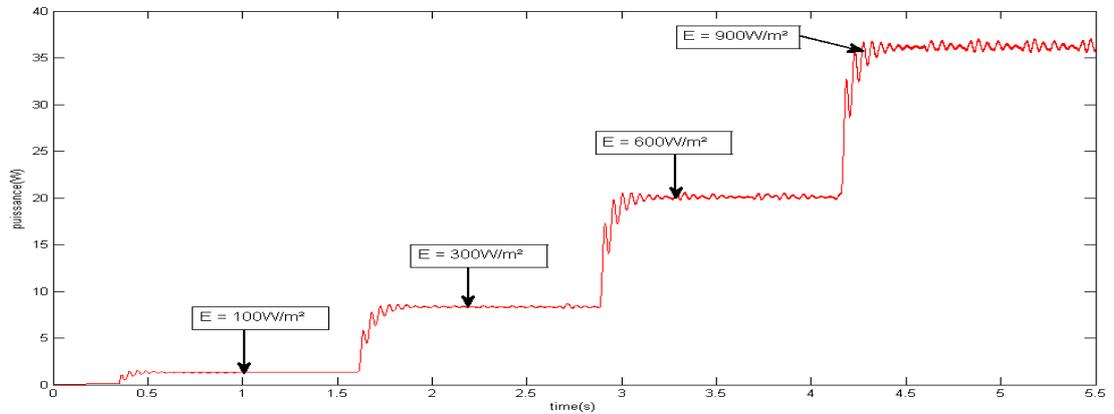


Figure III. 11 : Résultats d'un émulateur GPV pour différent éclaircment

III.9 Résultats finals

Dans cette partie en utilisent un émulateur GPV avec variation d'irradiation et en appliquant l'algorithme P&O

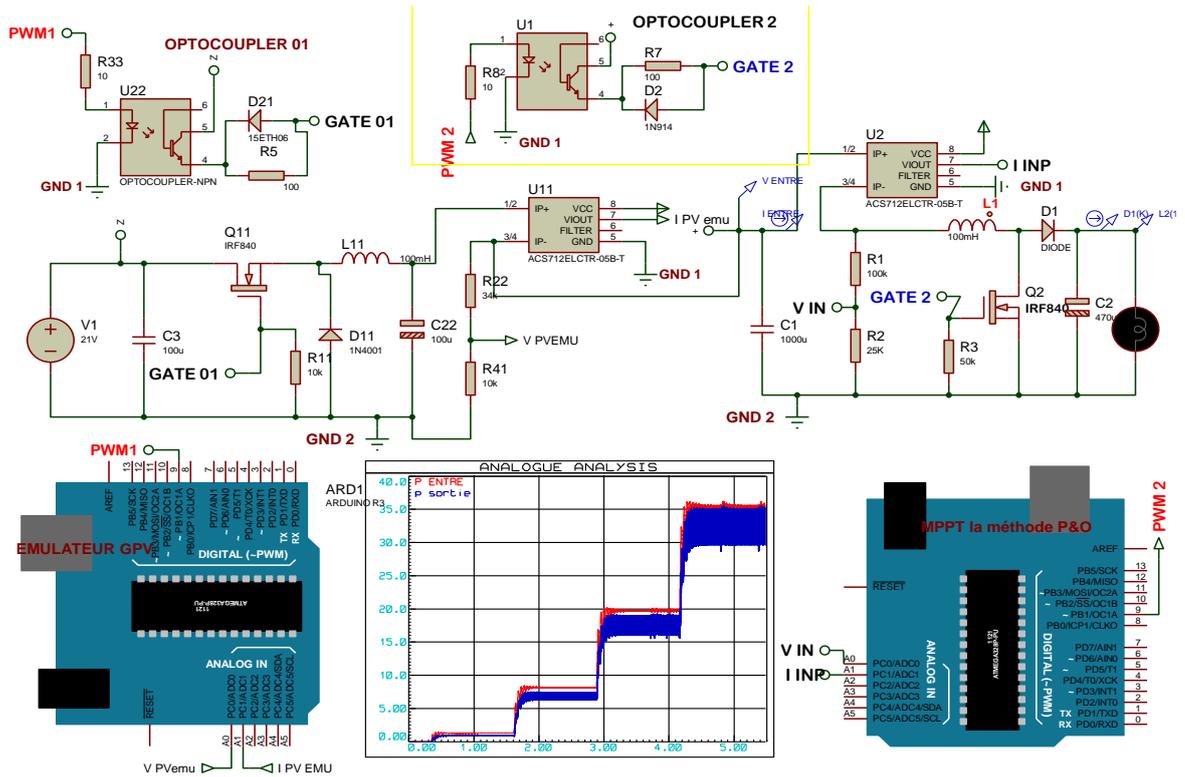


Figure III. 12 : Schéma équivalent d'un émulateur GPV dans l'espace Proteus plus la Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost

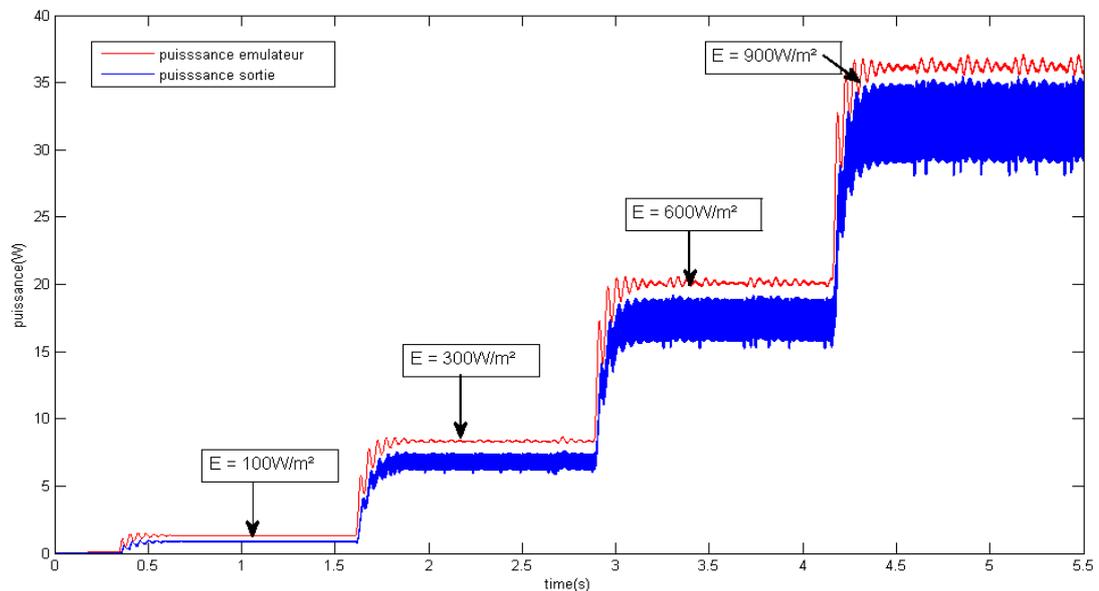


Figure III. 13 : Résultats de l'application de la méthode P&O sur hacheur Boost pour différent éclairement avec l'émulateur GPV

III.10 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié la commande MPPT, son principe et les différents types des méthodes de poursuite du point de puissance maximal générée par le générateur photovoltaïque.

Nous avons également simulé un système photovoltaïque dans l'espace Proteus. On utilisé les méthodes : P&O et IncCond implémentées dans une carte Arduino Uno afin de suivre vérifier le MPPT.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était d'étudier et de réaliser des hacheurs MPPT destiné à un système photovoltaïque. Ce système a plusieurs applications dans un secteur rural tel que les systèmes autonomes ou dans la ville comme le cas des systèmes connectés au réseau.

A cet effet, nous avons premièrement présenté des généralités sur le système photovoltaïque (La cellule PV, les différents types des cellules PV, les caractéristiques courant, tension et puissance tension et l'influence de l'éclairement et la température sur ces caractéristiques).

Comme le deuxième chapitre on a présenté la description et le dimensionnement des convertisseurs (DC/DC) Buck, et Boost, commandé par ARDUINO UNO. Ainsi, on a décrit la partie commande et le choix des composants semi-conducteurs, Ensuite nous avons fait une simulation sous MATLAB/SIMULINK. En plus, les trois hacheurs ont été réalisés, et testés attentivement .Les résultats pratiques ont été comparés avec les résultats de simulation.

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques. Dans le même but, plusieurs techniques de contrôle MPPT sont existé. Dans le troisième chapitre la méthode P&O a été expliqué et appliquée qu'il reste toujours simple et commode pour une réalisation pratique et donne des puissances proches aux puissances idéales. Les résultats trouvés montrent clairement l'intérêt d'introduire un tel système dans l'amélioration des performances.

Ce mémoire a présenté étude comparée avec la littérature. Pour cela, on propose de tester d'autres techniques de commande plus avancées afin d'avoir une puissance adéquate.

Références bibliographiques

- [01] **O. BENSEDDIK et F. DJALOU**D, « étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université kasdi Merbah –Ouargla ,2012.
- [02] **Bouhamed amira**, « Commande MPPT d'un convertisseur buck-boost Par arduino », Mémoire de master, Université Oum El Bouaghi ,2017.
- [03] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche – D.Delagnes / juin 07.
https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/Solaire-photovolta%C3%AFque/Energie_solaire_photovolta%C3%AFque.pdf.
- [04] **B. BOUDERHEM et Y.SALHI**, « Conception et Réalisation d'un Hacheur Boost MPPT à Base d'une Carte ARDUINO Application PV », Mémoire de master ,Université kasdi merbah –ouargla ,2017.
- [05] **H.MONIR et K. ALLEL**, « Etude et simulation d'un étage MPPT pour un générateur photovoltaïque à base d'un kit Arduino », Mémoire de master, Université d'adrar, 2017
- [06] **D LOUBNA et H .TAHIR**, « Structures et caractéristiques des éléments du système pv », Mémoire de master, Université de Guelma ,2011.
- [07] **B. Wafa** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de master, Université Ouargla, 2012.
- [08] **B.ABDELHAKIM**, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de _ haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome», Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas– Setif, 2015.
- [09] **Angel Cid Pastor**, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques »Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2006
- [10] **M. Amarouayache**, « Contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2014

- [11] **D. ALI**, « Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [12] **O.Thameur**, « Application des algorithmes génétiques dans la commande des hacheurs MPPT », Thèse de magister, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [13] **T. KEBIR.G Filiz** « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue » Mémoire de magister : Electronique : Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [14] **S. Yousf et –N. hatem**, « Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque » Mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2016.
- [15] http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques
- [16] **T. Bouguerra**, « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif », Mémoire de master, Université Mentouri de Constantine, 2014.
- [17] **M. AISSA**, « Modélisation-et-commande-d'une-chaine-de-pompage-photovoltaïque», Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [18] **S.Latreche et KH.Bouzid**, « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino Uno », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2016.
- [19] <https://www.arduino.cc>
- [20] <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>
- [21] <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- [22] Application de calcul pratique de l'inductance et la capacité du hacheur .pdf.
- [23] **B.Bayoub_D.Youcef** « Simulation et réalisation d'un MPPT appliqué à un système de pompage » Mémoire de Projet de Fin d'Etudes: Electronique: Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2012.