



جامعة الشهيد حمزة لخطير - الوادي
Université Echahid Hamma Lakhdar - El-Oued

UNIVERSITE EchahidHamma Lakhdar- EL Oued
Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Science et technologie

Filière : Electrotechnique

Option : Réseau Electrique

Présenté par :

Khelef Naima, Okba Meriem & Baouia Zahrat Eloula

Thème :

**Réalisation expérimentale d'un système photovoltaïque
contrôlée par MPPT à base d'une carte Arduino UNO**

Membres de jury :

Dr : GACEM Abdelmalek Encadreur

Dédicace

A sa biographie parfumée et à sa pensée éclairée :

Il a été le premier crédit pour ma réussite dans l'enseignement supérieur

(Mon père bien-aimé) que Dieu prolonge sa vie.

A celui qui m'a mis sur le chemin de la vie, et m'a calmé, elle m'a soigné jusqu'à ce que je sois grand

(Ma chère mère) que Dieu bénisse son âme.

A mes frères; Ceux qui ont eu un grand impact sur de nombreux obstacles et difficultés.

A tous mes honorables professeurs; Qui n'a pas hésité à me tendre la main.

Je vous dédie mes recherches, et j'espère qu'elles vous apporteront satisfaction.

Okba Meriem

Dédicace

Je dédie ce travail

A cette grande femme, ma mère.

À mon premier modèle, mon cher père.

*Al 'âme de ma grand-mère et de mon
oncle(que Dieu ait pitié d'eux).*

Ames frères.

Et à mes sœurs.

Au sucre de chez nous, mes neveux.

A tous mes parents, amis et professeurs.

Et tous ceux qui ont partagé mon succès.

KhelefNaima

Dédicace

J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à parentes en signe de Reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir Réussir, et voilà, l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

Et à mes chers frères et sœurs et leurs enfants

BaouiaZahratELoula

REMERCEMENT

Au nom de Dieu le Miséricordieux Louange à Dieu, qui est la source de toute connaissance dans ce monde.

Pour les forces et les conseils dans la réalisation de cette thèse. Nous traversons Notre profond sentiment de gratitude et nos profonds remerciements à notre encadrant,

Dr: GACEM Abdelmalek

pour ses précieux conseils, sa patience et sa gentillesse et des encouragements continus tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier

le Dr: KechidaRidha

pour sa contribution à la réalisation de ce travail

sommaire

Contenus	Pages
Dédicace	A
Remerciement	D
List de contenus	E
List de figures	K
List de tableaux	N
Listedes symboles et abréviations	O
ملخص	Q
Résumé	Q
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelables	
1. Introduction	5
2. Les ressources des énergies renouvelables	5
3. L'énergie solaire	6
3.1. Généralitéssurl'énergiesolaire	6
3.2. Rayonnement solaire	6
3.3. Spectre du rayonnement	7
3.4. Duréed'insolation	8
4. Cellule photovoltaïque	8
4.1. Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque	10

4.2. Caractéristique puissance-tension (P-V)	10
4.3. Modèled'une cellule solaire	11
5. Description d'un système photovoltaïque	12
5.1. Semi-conducteur	12
5.2. Formation de la fonction PN	12
6. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	13
7. Module photovoltaïque	14
7.1. Regroupement de cellules photovoltaïques	32
7.1.1. En parallèle	15
7.1.2. En série	15
7.1.3. Association mixte	16
8. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	16
8.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	17
8.1.1. Courant de court-circuit (I_{cc})	17
8.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})	17
8.1.3. Rendementénergétique	17
9. Effets des variations climatiques sur le module photovoltaïque	18
9.1. Influence de l'éclairement	18
9.2. Influence de la température	18
10. La protection des modules solaires	19

10.1.	Diode anti-retour	19
10.2.	Diodes by-pass	20
11.	Applications de l'énergie photovoltaïque	21
11.1.	Applications autonomes	21
11.2.	Applications non autonomes	21
12.	Avantages et Inconvénients d'un Module photovoltaïque	21
12.1.	Avantages	22
12.2.	Inconvénients	22
13.	Conclusion	23
Chapitre II : Convertisseurs DC-DC		
1.	Introduction	25
2.	Applications des convertisseurs DC/DC	25
3.	Convertisseurs DC-DC	26
4.	Rôle des convertisseurs DC-DC	27
5.	Les types des convertisseurs statiques DC-DC	27
5.1.	Convertisseur survolteur (Boost)	27
5.2.	Convertisseur dévolteur (BUCK)	28
5.3.	Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	28
5.4.	Modèle mathématique équivalent	29
5.5.	Modèle approximé du convertisseur Boost	29

6. Comparaison des montages	31
7. Conclusion	31
Chapitre III: Poursuite du point de puissance maximale	
1. Introduction	34
2. Poursuite du point de puissance maximale	34
3. Principe de fonctionnement de MPPT	35
4. Explications sur le MPPT (Maximum Power Point Tracking)	35
5. Classification des commandes MPPT	37
5.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée	37
5.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée	37
5.1.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur	38
5.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	38
5.2.1. MPPT Direct	38
5.2.2. MPPT Indirect	38
6. Algorithme Perturber et observer (P&O)	39
6.1. Les Algorithmes MPPT	39
6.1.1. Avantages Perturber et observer (P&O)	39
6.2. Algorithme Incrément de la conductance (IncCond)	40
6.2.1. Avantages Incrément de la conductance (In)	41
6.3. Algorithme "Hill Climbing"	41

6.3.1. Avantages Hill Climbing (hc)	42
7. Conclusion	43
Chapitre IV: Simulation et Réalisation de Système	
1. Introduction	45
2. Simulation du système	45
3. Schéma Matlab/Simulink dut simulation de système photovoltaïque	46
4. Résultats de la simulation	48
4.1. Algorithme IN (stable radiation)	48
4.2. Algorithme IN (variable radiation)	49
4.3. Algorithme PO (stable radiation)	50
4.4. Algorithme PO (variable radiation)	51
4.5. Hill Climbing (stable radiation)	52
4.6. Hill Climbing (variable radiation)	53
4.7. Résultats de la simulation des formes d'onde de suivi MPP	54
5. Matérielutilise	55
5.1. L'Arduino	55
5.2. Panneau solaire	56
5.3. Convertisseur Boost et circuit de contrôle de convertisseur	57
5.4. Capteur de courant	57
5.5. Capteur de tension	58

6. Réalisation du système	58
7. Résultats pratique	59
7.1. Incrément de la conductance (In)	59
7.2. Perturber et observer (P&O)	60
7.3. Hill Climbing (hc)	61
8. Discussion générale de résultats	61
9. Conclusion	62
Conclusion générale	63
Référence	65

Liste de figures

Figures	Pages
Figure (I-1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	7
Figure (I-2) : spectre solaire hors atmosphère	8
Figure (I-3) : Structure de cellule solaire	9
Figure (I-4) : Caractéristique courant – tension d’une cellule photovoltaïque	10
Figure (I-5) : Caractéristique puissance-tension	11
Figure (I-6) : Schéma équivalent de cellule PV	11
Figure (I-7) : Génération de la paire électron-trou	12
Figure (I-8): La structure PN	13
Figure (I-9): Structure d’une cellule photovoltaïque	14
Figure (I-10) : une cellule, un module, un panneau et un générateur photovoltaïque	14
Figure (I-11): association de cellules en série N_s (à gauche) et en parallèle N_p (à droite)	15
Figure (I-12) : Schéma équivalent électrique de la cellule PV	16
Figure (I-13) : L'influence de l'éclairement sur $P = f(V)$, et $I = f(V)$	18
Figure (I-14): Influence de la température sur les caractéristiques $P = f(V)$, et $I=f(V)$	19
Figure (I-15) : Exemple d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèle avec leurs diodes de protection	20
Figure (I-16): Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$	20
Figure (I-17): Exemple d'installation isolée ou couplée au réseau	21
Figure (II-1): Chaîne de conversion d’énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	25

Figure (II-2):convertisseurs DC/DC	27
Figure (II-3): Schéma électrique de le hacheurBoost	28
Figure (II-4) : Schéma électrique de le hacheur Buck	28
Figure(II-5):Schéma électrique de le hacheur Buck-Boost	29
Figure (II-6): Allure des variables dynamiques IL	30
Figure (III-1): La caractéristique I(V), P(V) et la trajectoire de PPM	35
Figure (III-2): Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	36
Figure (III-3): Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale(a)l'influence de l'éclairement (b) l'influence de la charge (c) l'influence de la température	36
Figure (III-4) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)	39
Figure (III-5):Organigramme de l'algorithme 'PO'	40
Figure(III-6): Organigramme de l'algorithme 'INC'	41
Figure (III-7): Organigramme de l'algorithme Hill Climbing	42
Figure (IV-1): Données sur les caractéristiques électriques du module PV tirées de Matlab/Simulink	46
Figure (IV-2): Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque avec le méthodes étudiées de MPPT	47
Figure (IV-3): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV et Résultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV	48
Figure (IV-4): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et Résultat de simulation de :(A) courant PV (B) tension PV	49
Figure (IV-5): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et résultat de simulation de: (A) courant PV (B) tension PV	50
Figure (IV-6): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et résultat de simulation de: (A) courant PV (B) tension PV	51
Figure (IV-7): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et résultat de simulation de: (A) courant PV (B) tension PV	52
Figure (IV-8) (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et résultat de simulation de: (A) courant PV (B) tension PV	53

Figure (IV-9) – Résultats de la simulation des formes d’onde de suivi MPP : (A) rapport cyclique,(B) puissance PV,(C) courant PV et (D) tension PV pour le fonctionnement en régime permanent avec deux facteur de mise à l’échelle MPPT: (bleu) IN basé sur 0.02 et (rouge) IN basé sur 0.0045 et (vert) IN basé sur 0.008.	54
Figure (IV-10): Photo réel Arduino UNO	55
Figure (IV-11) : Photo réel panneau PV et Plaque signalétique du panneau PV	56
Figure (IV-12): Photo réel de convertisseur Boost	57
Figure (IV-13) : Capteur de courant et Capteur de tension	58
Figure (IV-14): photo réel de système photovoltaïque	59
Figure (IV-15): Résultat pratique des algorithmes utilisée	59
Figure (IV-16): Résultat pratique des algorithmes utilisée	60
Figure (IV-17): Résultat pratique des algorithmes utilisés	60
Figure (IV-18): Résultat pratique des algorithmes utilisée	60
Figure (IV-19): Résultat pratique des algorithmes utilisée	61
Figure (IV-20): Résultat pratique des algorithmes utilisée	61

liste de tableaux

Tableaux	Pages
Table (II.1):Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu	31
Tableau (IV.1) :Paramètre de convertisseur boost	46
Table (IV-2): la carte arduinoUNO	56

LISTE DES SYMBOLS ET ABRÉVIATIONS

E : Eclairage (W/m^2)

Λ : vitesse spécifique

H : Constante de PLANCK [J/s]

E_{pv} : L'énergie de photon [eV]

I_{ph} : Le photo-courant (A)

I : Le courant généré par la photopile(A)

I_s : Le courant de saturation(A)

I_{sc} : le courant du court-circuit(A)

I_L : Le courant de l'inductance du hacheur (A)

I_{pv} : Courant délivré par le générateur PV (A)

V : la tension aux bornes de la cellule(V)

q : La charge de l'électron = $1,6.10^{-19}$ C

R_s : La résistance série (Ω)

R_{sh} : La Résistances shunt (Ω)

T : La température de fonctionnement en Kelvin.

A : le facteur de qualité de la cellule

V_{th} : La tension thermique

V_{oc} : La tension de circuit ouvert(V)

P : La puissance caractéristique(W)

P_{max} : La puissance maximale(W)

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

V_{opt} : Tension optimale (V)

I_{opt} : Courant optimum (A)

η : Rendement de la cellule [%]

η_{mpp} : Rendement du MPPT [%]

MPPT : maximum power point tracking

PPM : point de fonctionnement optimale

G : L'éclairage de référence ($1000 W/m^2$)

C : Condensateur de filtrage de sortie du hacheur [μF]

L : Inductance du hacheur

Q : L'interrupteur du hacheur

D : Rapport cyclique

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur Photovoltaïque

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PO : Perturbation et Observation

DC : Courant Continu (Direct Current)

DC-DC : conversion continu-continu

Inc.CoN : Incrément de conductance

HC: Hill Climbing

ملخص:

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرا هاما من مصادر الطاقة المتجددة. تمثل الألواح الكهروضوئية مصدرا للطاقة الغير مستقرة حيث نجد ان نقطة الاستطاعة تتعلق بدرجة الحرارة و مستوى الاشعاع الضوئي. لذلك فانه من الضروري تتبع نقطة الاستطاعة لتحقيق اقصى فعالية، في هذا العمل لأجل تحسين و مثالية التشغيل اقترحنا طريقة التحكم (MPPT) لتعقب نقطة الطاقة القصوى للوح الضوئي. حيث اثبتت الدراسات في مختلف التطبيقات مدى فعاليتها في ايجاد الحلول الشاملة بالأخص في الحالات التي يتعذر فيها تحليل المشكل خطيا. لبيان مدى فعالية هذه المنهجية قمنا بتطبيق هذا البرنامج لتعقب نقطة الاستطاعة العظمى و التي يتم استعمالها لاستغلال احسن للطاقة الناتجة عن اللوح الكهروضوئي و تحت شروط متغيرة تتمثل في كل من (درجة الحرارة و الاشعاع الضوئي)، في دراستنا نقوم بإجراء مقارنة بين تقنية تحكم المبنية على خوارزمية (PO) و خوارزمية (INC) و خوارزمية تسلق التلال (HC). حيث يتم تصميم نظام كهروضوئي من وحدة شمسية مزودة بمنظم للطاقة الشمسية MPPT و محاكاته. حيث نجد ان النتائج المحصل عليها تبين فعالية التقنيات لإيجاد الحل الامثل (استطاعة قصوى) تحت مختلف الشروط المذكورة اعلاه بأسرع وقت ممكن

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي او لوح ضوئي (PV), تعقب نقطة الطاقة القصوى (MPPT), تسلق التلال (HC), زيادة التوصيل (INC), الاضطراب و المراقبة (PO).

Résumé :

L'électricité photovoltaïque est perçus comme une importante source d'énergie renouvelable . Le Champ photovoltaïque est une source de puissance instable, dont le point de puissance crête dépend de Température et de l'irradiation. Le suiveur de point de puissance maximale est alors nécessaire pour une efficacité optimale. A cet effet, dans le présent travail l'optimisation du fonctionnement par l'utilisation de méthode de contrôle (MPPT) est proposée pour détecter le point de puissance maximale pour panneau photovoltaïque, ils sont utilisés pour générer la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. Dans notre étude, nous faisons une comparaison de deux technologies de contrôle (P&O), (InCon) et (hc). Un système photovoltaïque est composé d'un module solaire avec régulateur solaire MPPT il est modélisé et simulé. Les résultats de simulation montrent que l'efficacité de ces techniques est de tirer le maximum d'énergie avec un temps de rapide lors des variations dans les conditions de travail.

Mots clés : Système photovoltaïque, PV, Optimisation, MPPT, Perturbation et Observation (P&O), Inc.CoN : Incrément de conductance (Inc.CoN) , Hill Climbing (HC).

Introduction Générale

Introduction Générale:

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle [A].

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV[B].

En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température) [C].

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant[D],

aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du GPV, parmi les techniques les plus utilisées :

- Perturbation et Observation (**P&O**)
 - Incrémental conductance (*Inc.*).
 - Ainsi, nous présentons dans ce projet la simulation sous matlab/simulink et la réalisation de un contrôle MPPT numérique basé sur les algorithmes MPPT qui sont PO, INC,HC, en faisant un réalisation au moyen d'une carte Arduino UNO avec contrôle MPPT.

La thèse se compose de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les énergies renouvelables Et le principe de la conversion photoélectrique et de la modélisation du module photovoltaïque, et nous incluons également les technologies photovoltaïques et les applications des systèmes pv.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le Convertisseurs (DC-DC).

Dans le troisième chapitre, nous avons examiné le suivi des points extrêmeMPPT est couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques (convertisseurBoost), le problème MPPT est attribué et pourquoi nous avons Vous avez besoin de mppt.

Ensuite, ils présentent et expliquent divers algorithmes et principes de mpptet le dernier chapitre, nous présenterons les résultats de simulation.

Enfin, nous terminerons notre thèse par une conclusion générale résumant intérêt de notre étude.

Chapitre I :
Généralités sur les
énergies renouvelables

Introduction:

Répondre aux besoins actuels en énergie sans compromettre ces générations futures, accroître l'autonomie énergétique des pays en développement, fournir de l'énergie aux deux milliards d'habitants de la planète qui vivent encore sans électricité : tels sont les enjeux du XXI^{ème} siècle. Le soleil est une gigantesque boule de gaz qui provoque l'émission d'un rayonnement d'une forte puissance. Il est à l'origine de toutes les sources d'énergie sur la planète: les plus consommées, le pétrole, le charbon, le gaz, sont devenues conventionnelles. Ce sont des énergies fossiles: elles sont épuisables et polluantes. Il faut alors économiser ces énergies et chercher d'autres sources de chaleur : le concept solaire est né. S'il faut préserver les ressources épuisables, diminuer les rejets radioactifs et l'émission de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables restent alors une solution en puissance. Pour exploiter l'énergie solaire au meilleur profit (meilleures conditions de prix) [1].

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique [2]. La tension et le courant générés par le GPV peuvent varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. Dans ce chapitre nous présentons les ressources des énergies renouvelables et le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

1. Les ressources des énergies renouvelables:

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des

gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...). La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [3]

2. L'énergiesolaire:

3.1. Généralitéssurl'énergiesolaire:

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 , lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [4].

3.2. Rayonnementsolaire:

- Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement[27].

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s , met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5 \mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K :

- Diamètre de soleil $D_s=1.39.10^9\text{m}$.
- Diamètre de la terre $D_t=1.27.10^7\text{m}$.
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts}=1.5.10^{11}\text{ m}$. [5]

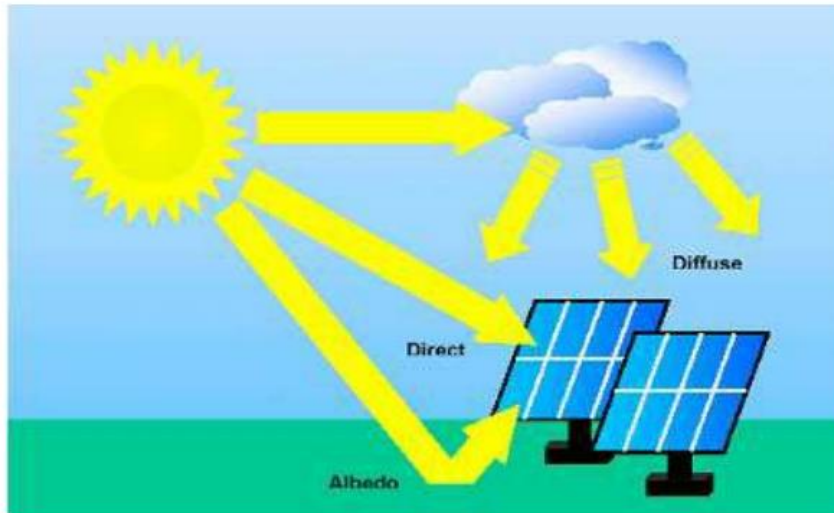


Figure (I-1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

3.3. Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ : Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en : [6]

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38\ \mu\text{m}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78\ \mu\text{m}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10\ \mu\text{m}$ 45.6%

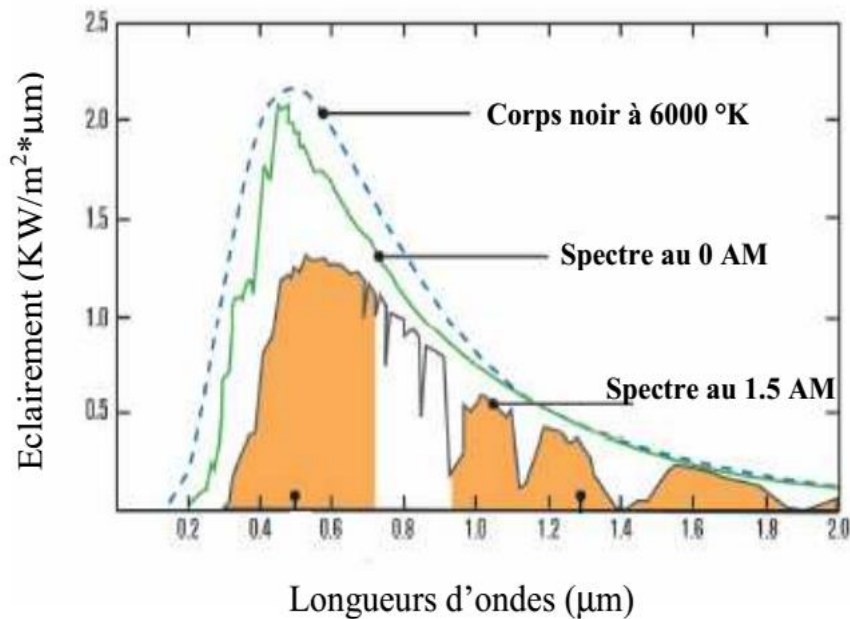


Figure (I-2) : spectre solaire hors atmosphère

3.4. Duréed'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 biens visible sont enregistrées 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 astronomiquerelatif 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 [3].

4. Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est conçue en se basant sur le phénomène physique appelé «effet Photovoltaïque» [5]. Une force électromotrice apparaît lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, sa disposition, température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule.

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre couche dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme montré dans (la figure I-3).

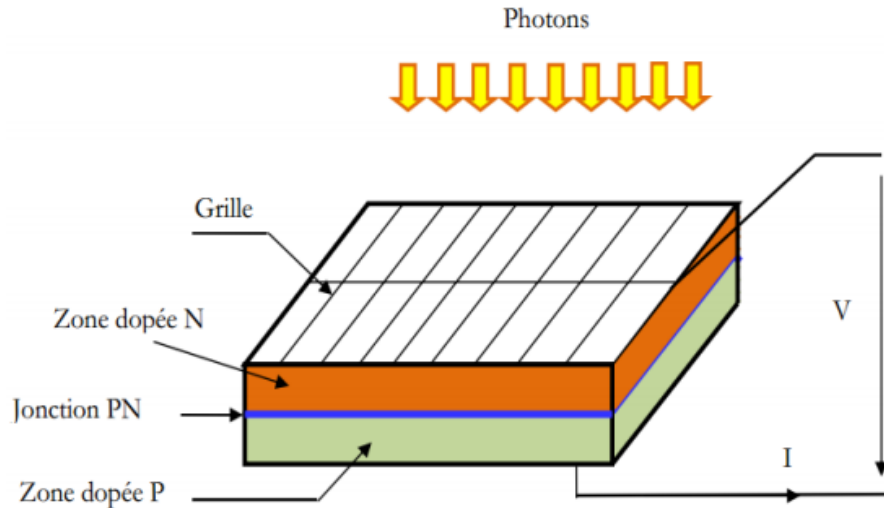


Figure (I-3) : Structure de cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre couche dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme montré dans la figure précédente. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

4.1. Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque :

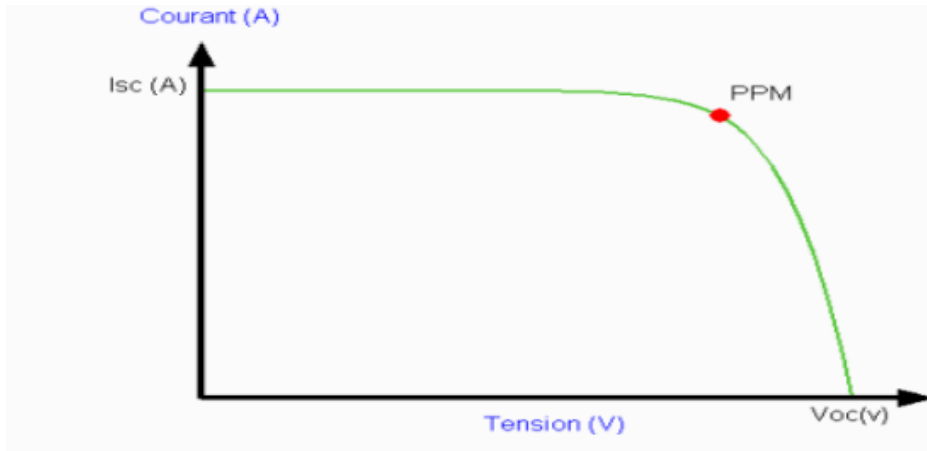


Figure (I-4) : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.

Comme nous le voyons sur la figure (I.4), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe $I(V)$ non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cette courbe nous informe sur trois points importants :

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal $ISC(A)$.

Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit $ISC (A)$.

- Le point de la tension maximale de la cellule $Voc(V)$, (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert $Voc(V)$ [5].

4.2. Caractéristique puissance-tension (P-V) :

La puissance crête d'une cellule PV, notée Wc (Watt crête) ou Wp (Watt peak) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard : [07]

- éclairement solaire de $1 \text{ kW} / \text{m}^2$;
- température de la cellule PV égale à $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

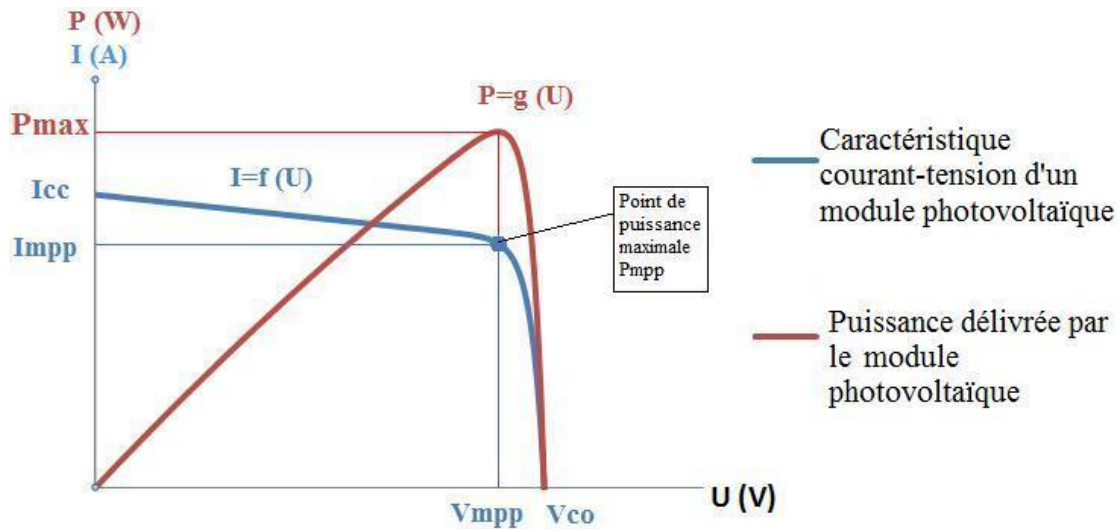


Figure (1-5) : Caractéristique puissance-tension.

4.3. Modèle d'une cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_p comme le montre le schéma équivalent de la figure suivant [5] :

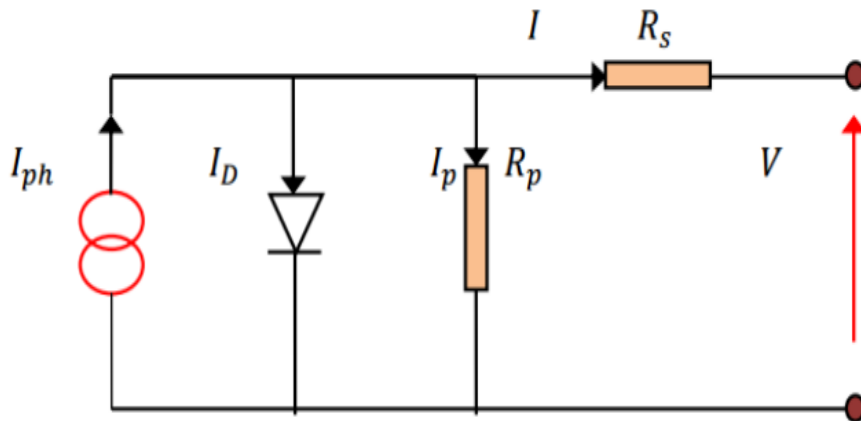


Figure (1-6) : Schéma équivalent de cellule PV.

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction.

5. Description d'un système photovoltaïque :

5.1. Semi-conducteur :

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [8]

5.2. Formation de la jonction PN :

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres. (Figure I.7)

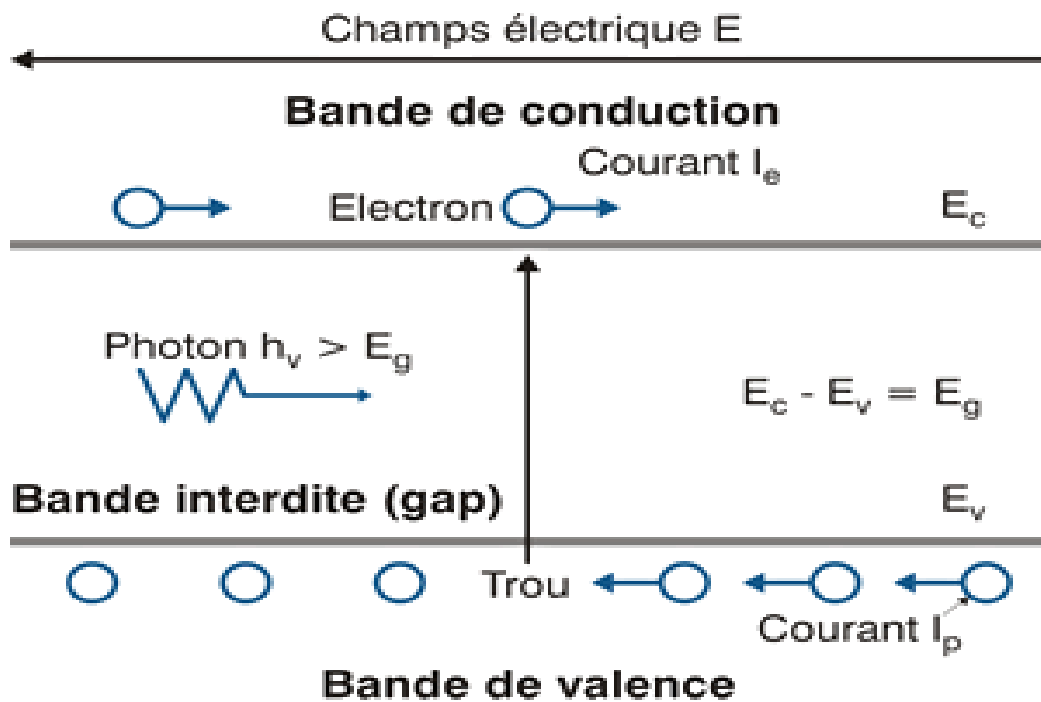


Figure (I-7) : Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo-générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.

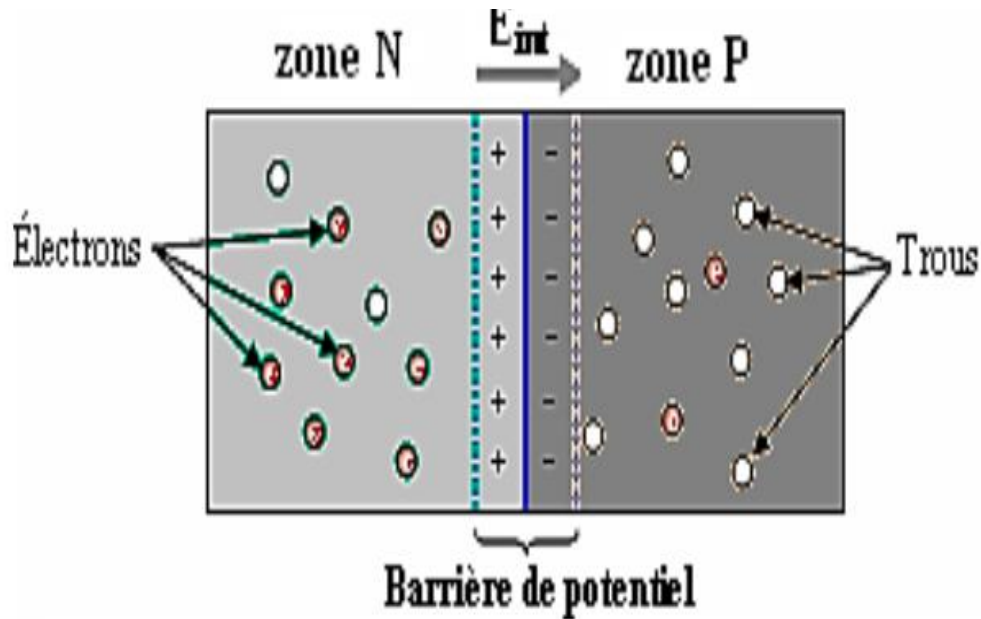


Figure (I-8) : La structure PN.

6. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [8].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la (Figure I-9) ci-dessous.

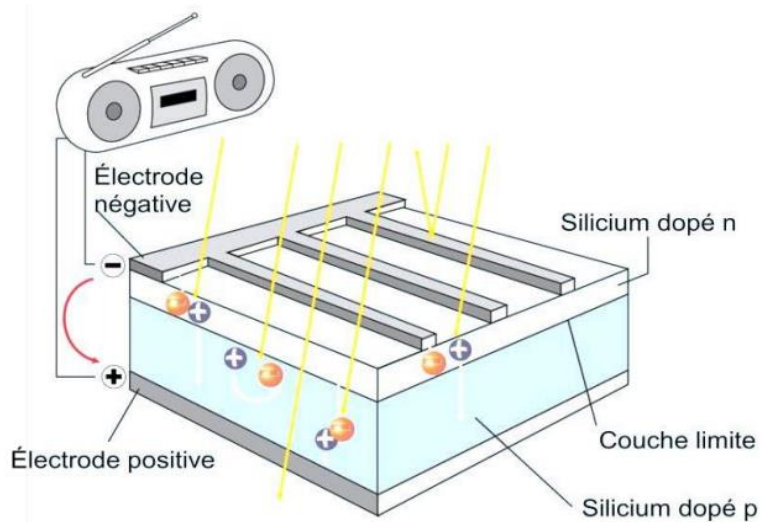


Figure (I-9): Structure d'une cellule photovoltaïque.

7. Module photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont connectées en série pour former le module photovoltaïque, le photovoltaïque module est généralement composé de 36 cellules en série. Plusieurs modules forment un panneau photovoltaïque, plusieurs panneaux forment un champ photovoltaïque ou arra. [9].

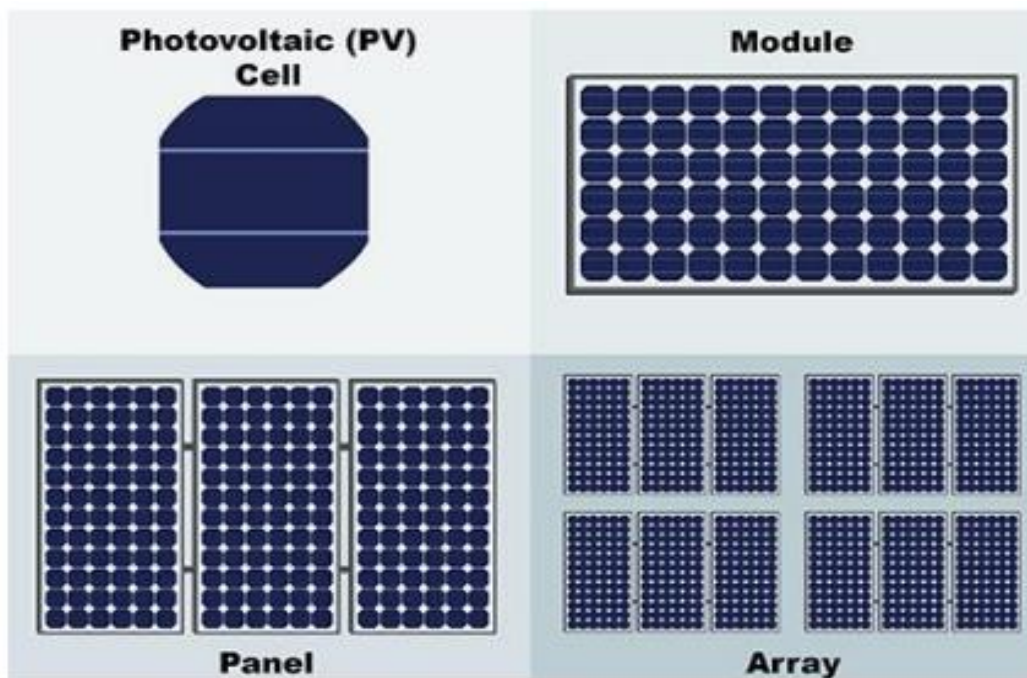


Figure (I-10): une cellule, un module , un panneau et un générateur photovoltaïque.

7.1. Regroupement de cellules photovoltaïques :

7.1.1. En parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellule est possible et permet de augmenter le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupe de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la résultant caractéristique du groupe est obtenue en additionnant les courants [9].

$$I_{scNP} = NP \times I_{sc} \dots\dots\dots(I.1)$$

$$V_{oc} = V_{ocNp} \dots\dots\dots(I.2)$$

I_{scNP} : La somme des courants de circuit de court de la cellule (NP) en parallèle.

V_{ocNP} : La tension en circuit ouvert des cellules (NP) en parallèle.

7.1.2. En série :

Une association de (Ns) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors parcourues par le même courant et résultant du regroupement en série s'obtient en ajoutant l'élémentaire tensions de chaque cellule. L'équation résume la caractéristiques électriques d'une série association de (Ns) cellules [9].

$$V_{ocNS} = NS \times V_{oc} \dots\dots\dots(I.3)$$

$$I_{scNS} = I_{sc} \dots\dots\dots(I.4)$$

V_{ocNS} : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{scNS} : Le courant de court-circuit de Ns cellules en série.

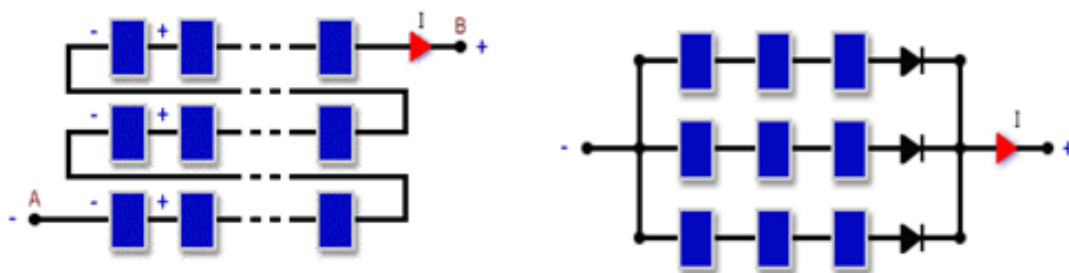


Figure (I-11): association de cellules en série Ns (à gauche) et en parallèle Np (à droite).

$$P_{générateur} = Nms \cdot NBP \cdot P_{module} \dots\dots\dots(I.5)$$

$$V_{générateur} = Nms \cdot V_{module} \dots\dots\dots(I.6)$$

$$I_{générateur} = NBP \cdot I_{module} \dots\dots\dots(I.7)$$

$$R_{s \text{ générateur}} = R_{s \text{ module}} \cdot Nms \div NBP \dots\dots\dots(I.8)$$

Nms : Nombre de modules associés en série.

NBP : Nombre de branches parallèles. [9]

7.1.3. Association mixte :

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque.

8. Caractéristiques électriques d’une cellule photovoltaïque :

La figure (I-12) présente le schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.[10]

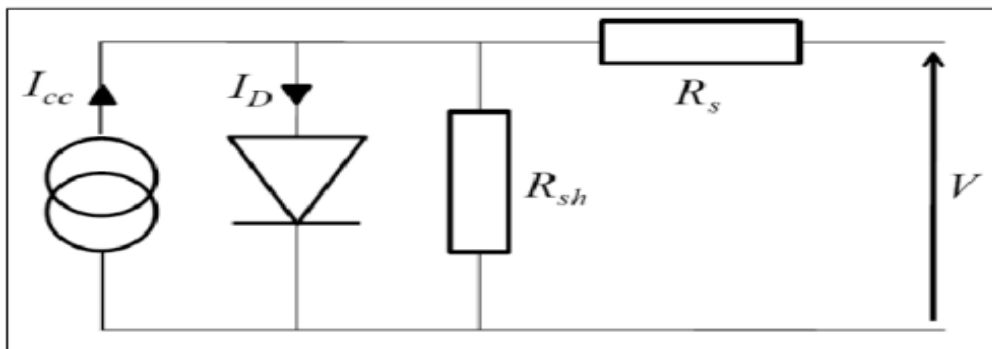


Figure (I-12) : Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d’une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + I_{pv} R_{ser})}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_{ser}}{R_{shu}} \dots \dots \dots (I.9)$$

Où I_{sat} est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), e est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairage et de la température ou bien courant de (court-circuit) , R_{shu} est la

résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_{ser} est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [10]

8.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes : [10].

8.1.1. Courant de court-circuit (I_{cc}):

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.10), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc}R_{ser})}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc}R_{ser}}{R_{shu}} \dots \dots \dots (I.10)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv}R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (I.11)$$

Devant . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \dots \dots \dots (I.12)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$) [10].

8.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}):

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{eV_{pv}}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \dots \dots \dots (I.13)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \dots \dots \dots (I.14)$$

8.1.3. Rendement énergétique:

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \dots \dots \dots (I.15)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [10].

9. Effets des variations climatiques sur le module photovoltaïque :

9.1. Influence de l'éclairement :

La figure (I.13a) illustre la variation de la puissance délivrée par la génératrice fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ [9].

La figure (I.13b) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I = f(V)$.

A température constante, on observe que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Comme le courant de court-circuit est linéaire fonction de l'éclairement tandis que la tension en circuit ouvert est une fonction logarithmique.

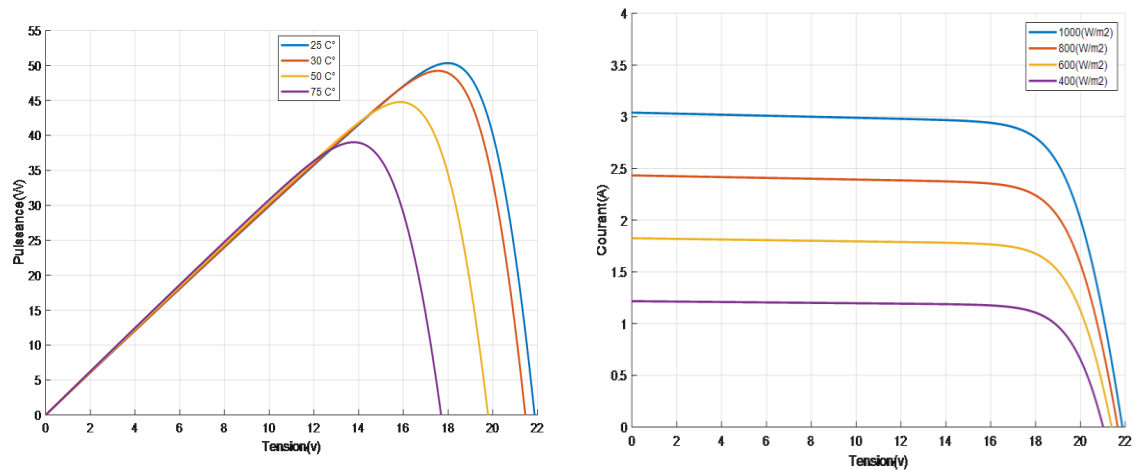


Figure (I-13) : L'influence de l'éclairement sur $P = f(V)$, et $I = f(V)$.

9.2. Influence de la température :

La figure (I.16a) 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 $P(V)$.

La figure (1.16b) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I = F(V)$. Il

Est essentiel pour comprendre l'effet d'un changement de température d'une cellule solaire sur caractéristique $I = F(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la

température affecte négativement la tension de le circuit s'ouvre. Lorsque la température augmente, la tension en circuit ouvert diminue.

Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [9].

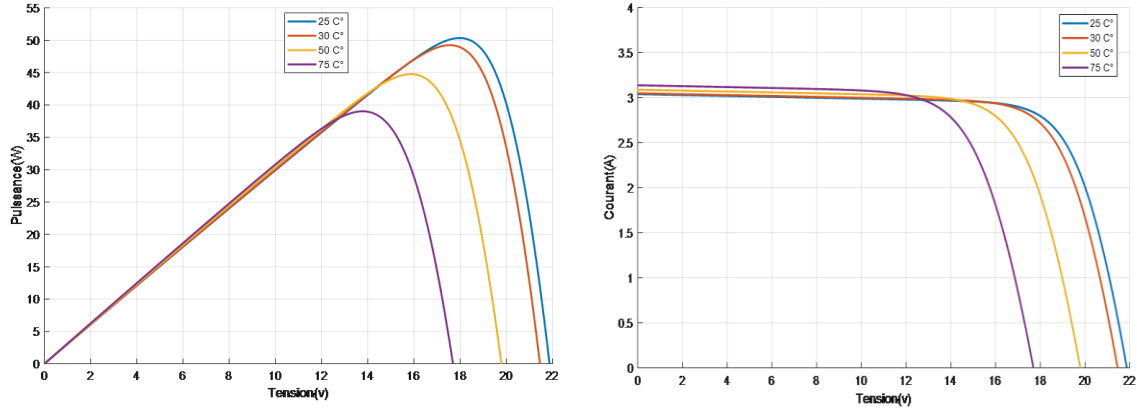


Figure (I-14) : Influence de la température sur les caractéristiques $P = f(V)$, et $I=f(V)$

10. La protection des modules solaires :

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles figure (I-15) : [11].

10.1. diode anti-retour :

Empêchant un courant négatif dans les GPV (pour éviter les courants inverses). Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien générale quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur [11].

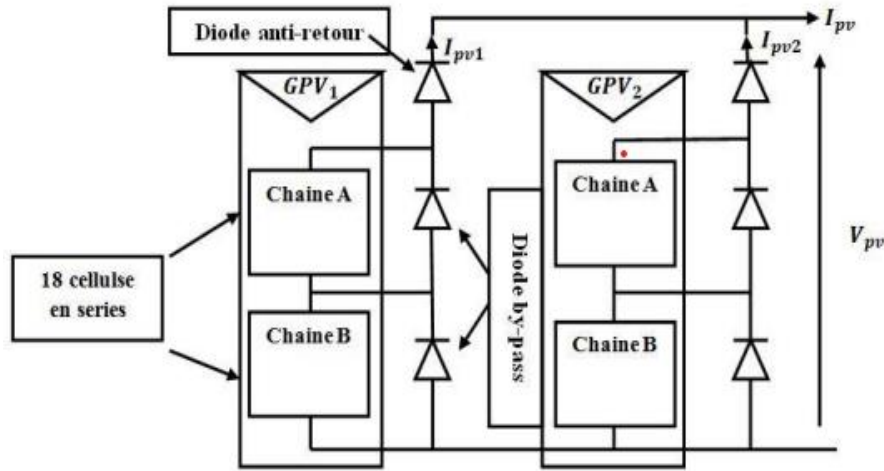


Figure (I-15) : Exemple d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèle avec leurs diodes de protection .

10.2. diodes by-pass :

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (I-16), par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues a de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [11].

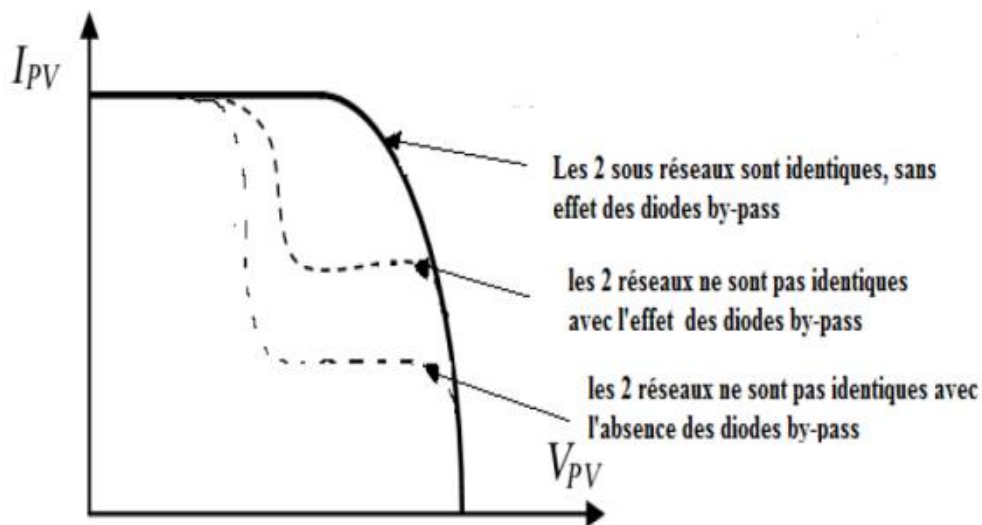


Figure (I-16) : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V).

11. Applications de l'énergie photovoltaïque :

Outre les applications spatiales à l'origine du développement du photovoltaïque techniques et applications en électronique (alimentation de calculatrices, de montres, etc.), il existe deux grandes familles d'applications, à savoir :

11.1. Applications autonomes :

Pour l'alimentation de sites isolés du réseau de distribution d'électricité (logements, relais radio, pompage, balisage en mer, électrification rurale dans les pays du Sud...). [9]

11.2. Applications non autonomes :

Il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque de manière non autonome, en le connectant au réseau public de distribution d'électricité. Nous aurons alors une petite électricité usine de production dont l'énergie sera soit consommée sur place par le propriétaire, soit revendue sur le réseau. En cas de surproduction, le générateur photovoltaïque alimente le réseau et inversement, le réseau alimente la distribution en cas de déficit ou hors production solaire. [9]

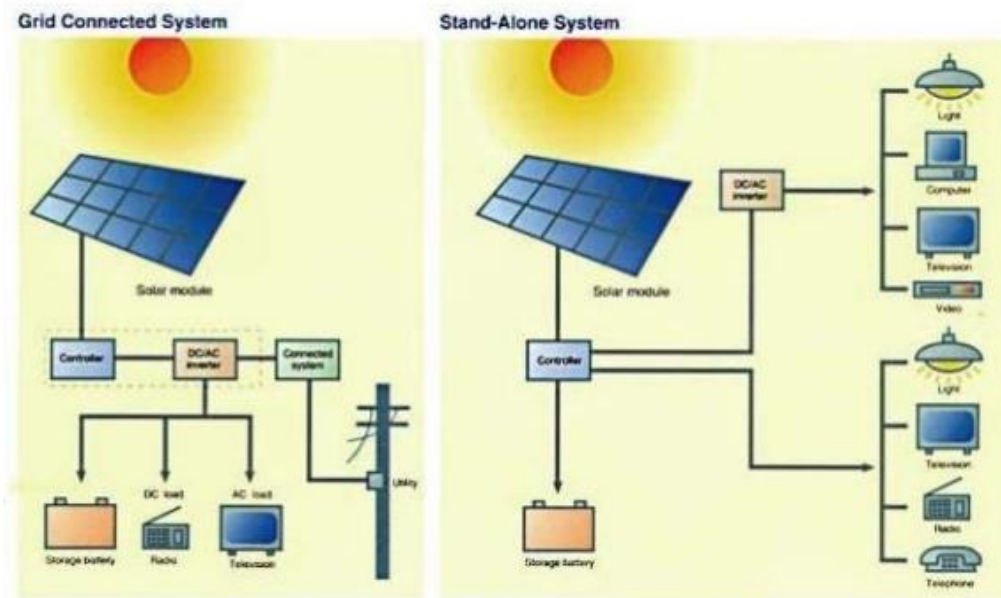


Figure (I-17) : Exemple d'installation isolée ou couplée au réseau.

12. Avantages et Inconvénients d'un Module photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients [8].

12.1. Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [8]

12.2. Inconvénients :

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20% (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an [8].

13. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque, puis expliqué le processus donner un aperçu de la modélisation de la cellule photovoltaïque, de ses méthodes d'assemblage, de ses principales propriétés et de l'effet de la température et du rayonnement solaire sur Propriétés I-V et P-V.

Chapitre II :

Convertisseurs DC-DC

1. Introduction :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie.

Dans ce chapitre nous étudierons la modulation de différent type des convertisseurs (DC /DC), et la simulation d'un hacheur survolteur. [12]

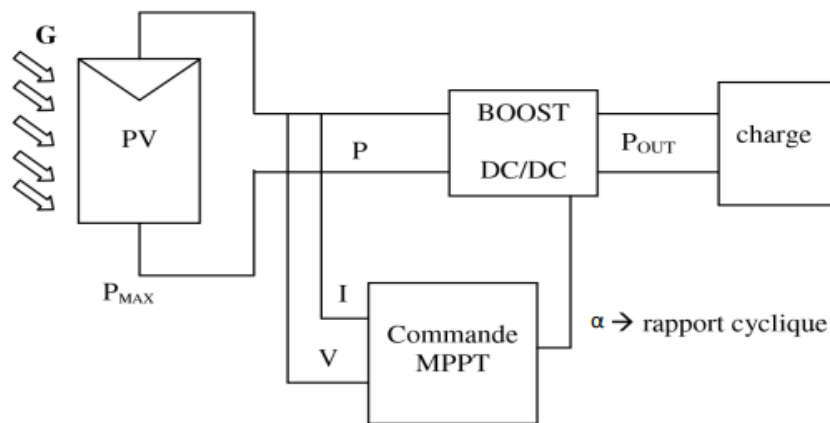


Figure (II-1) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

2. Applications des convertisseurs DC/DC :

Les niveaux de puissance que l'on trouve dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs des équipements portables, à une dizaine ou centaine de watts dans les alimentations des ordinateurs de bureau, aux kilowatts ou mégawatts dans la commande des moteurs à vitesse variable, et jusqu'aux térawatts dans les centrales électriques du secteur [13].

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions : modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se

trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré, des circuits électroniques numériques et analogiques, des écrans, des actionneurs, des claviers, etc. Plus de 5 à 6 niveaux de tensions peuvent cohabiter dans un ordinateur portable [13].

3. Convertisseurs DC-DC :

Un Convertisseur DC-DC est un circuit d'électronique de puissance ou un dispositif électromécanique qui convertit une source de courant continu (DC) d'un niveau de tension spécifié à un autre différent. C'est un type de convertisseur de puissance électrique. Les niveaux de puissance considérés par de tels circuits vont de très bas (petites batteries) à très haut (transmission de puissance à haute tension voire très haute tension).

Ces convertisseurs assurent des rendements élevés de conversion d'énergie et ils peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement.

Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée [14].

Ces adaptateurs utilisent des interrupteurs électroniques, à base de semi-conducteurs tels que : le thyristor, transistor de puissance ou l'IGBT. . .etc, parce qu'ils engendrent une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre [15].

En général, trois types de convertisseurs de base sont responsables selon leur utilisation. Ils soit augmenter en augmentant la tension à la sortie connue sous le nom de Boost Converter ou en abaissant par réduisant la tension connue sous le nom de convertisseurs Buck. Il existe une autre classe de convertisseurs utilisés pour augmenter ou diminuer la tension de sortie décrite sous le nom de convertisseurs Buck-Boost. Les convertisseurs Buck-Boost inversent la polarité de la tension de sortie, en tant que tels, ils sont parfois appelés onduleurs.

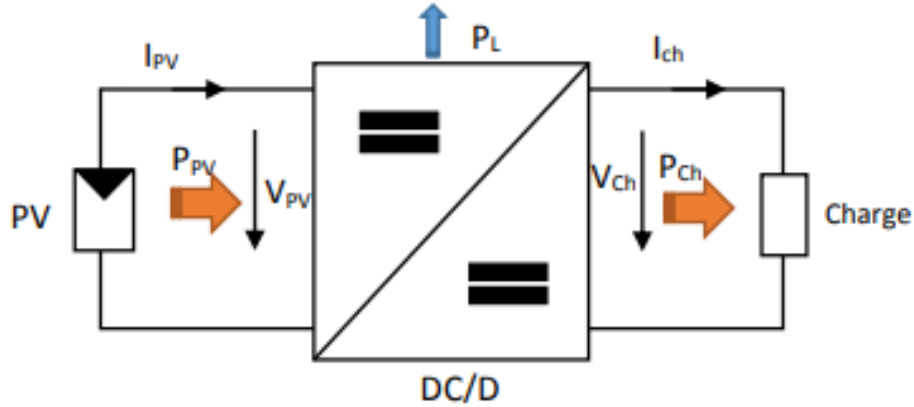


Figure (II-2) : convertisseurs DC/DC.

4. Rôle des convertisseurs DC-DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [16].

5. Les types des convertisseurs statiques DC-DC :

Il existe plusieurs types de convertisseurs statiques (DC/DC) dont les plus connus sont : le convertisseur statique dévolteur (Buck), le convertisseur statique survolteur (Boost) et le convertisseur statique dévolteur-survolteur (Buck-Boost). Ces convertisseurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV avec les différentes charges.

5.1. Convertisseur survolteur (Boost) :

Le convertisseur survolteur, également appelé, le hacheur élévateur ou survolteur. Il permet d'adapter la tension de GPV aux besoins de la charge par la variation de rapport cyclique D . L'entrée du hacheur est une source de courant DC et la sortie du hacheur est un récepteur (absorbant de l'énergie) de tension DC [17].

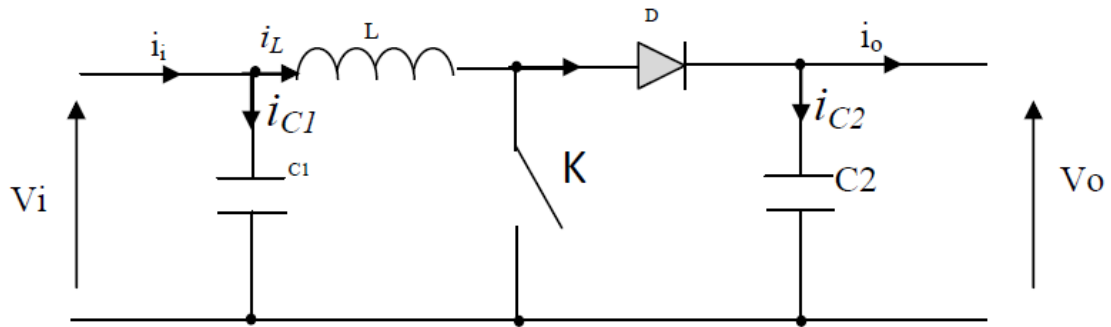


Figure (II-3) : Schéma électrique de l'hacheurBoost.

5.2. Convertisseur dévolteur (BUCK) :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K (Fig.II.4) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [18].

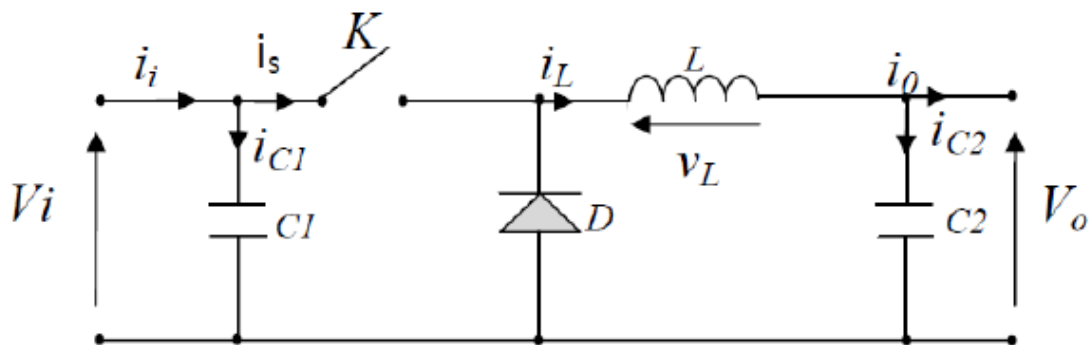


Figure (II-4) : Schéma électrique du hacheur Buck.

5.3. Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

Le convertisseur dévolteur-survolteur a acquis les caractéristiques électriques des deux types évoqués précédemment, il présente donc une sortie d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue son schéma de base est illustré par la **Figure (II-5)** [19].

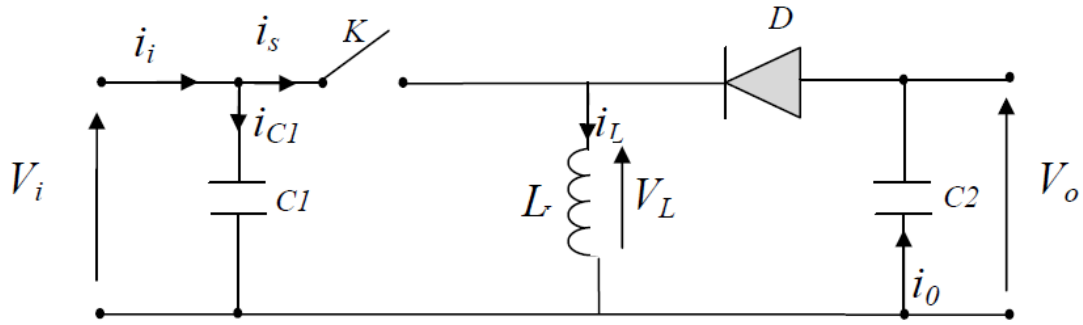


Figure (II-5) : Schéma électrique du hacheur Buck-Boost.

5.4. Modèle mathématique équivalent :

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de Fonctionnement donne :

Pour la première période αT_s :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_g(t)}{dt} = i_1(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = +V_g(t) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)T_s$

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_g(t)}{dt} = i_g(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \dots\dots\dots(\text{II.2}) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_g(t) - V_o(t) \end{cases}$$

5.5. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations de base (Equ.II.1) et (Equ.II.2) Représentent le convertisseur Boost pour une période αT_s et $(1-\alpha) T_s$ respectivement. Le convertisseur oscille entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques $C1, VL$ est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($\epsilon e \approx 1 + \text{si } \epsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux laps de temps αT_s et $(1-\alpha) T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dy} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dy(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dy(1-\alpha)T_s} (1-\alpha) T_s \quad \text{(II-3)}$$

ou $\left\langle \frac{dx}{dy} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T_s . Cette relation est valide si

$$\frac{dx}{dy(\alpha T_s)} \text{ et } \frac{dx}{dy(1-\alpha)T_s} \dots \dots \dots \text{(II-4)}$$

sont constants sur les périodes αT_s et $(1-\alpha) T_s$ respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αT_s et $(1-\alpha) T_s$ sont très faibles devant la constante de temps du circuit C/R , L/RL [20].

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la (Fig.II-5).

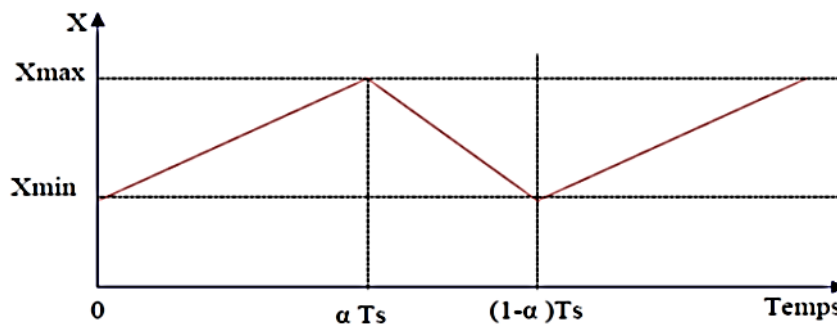


Figure (II-5) :Allure des variables dynamiques IL.

En appliquant la relation (II-4) sur les systèmes d'équations (II.2) et (II-3), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [20] :

$$\begin{cases} i_L = i_g - C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_g = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \dots \dots \dots \text{(II.5)}$$

Comme le présente la (Fig.II.5), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance de le hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off).

Et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la (Fig II.5), comme suit.

6. Comparaison des montages :

Le tableau II.1 résume les gains en tension et les contraintes sur les interrupteurs des différents montages. Pour ces convertisseurs, l'évolution des gains en tension en fonction du rapport cyclique. Si plusieurs montages peuvent être considérés comme élévateurs, en particulier si le rapport cyclique est supérieur à 0,5, seul le montage Boost est élévateur sur toute la plage de réglage des rapports cycliques. Pour un rapport cyclique de 0,5 par exemple, le Boost possède une tension de sortie double de la tension d'entrée. Alors que pour les autres montages élévateurs, la tension de sortie est pour cette valeur du rapport cyclique égale à la tension d'entrée. Ce n'est que lorsque le rapport cyclique se rapproche de 1 que les autres montages élévateurs tendent à ressembler au montage Boost[10].

convertisseurs / paramètres	Gain en Tension $\frac{V_s}{V_e}$	contraintes en Tension $V_{k, \max} =$ $ V_{d, \max} $	contraintes en Courant $i_{k, \max} =$ $i_{d, \max}$
Boost	$\frac{1}{1 - \alpha}$	$\frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$
Buck-Boost	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$\frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{V_c}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$
Buck	α	V_e	$I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$

Table (II.1) : Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.

7. Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse du fonctionnement du convertisseur Boost et ses performances ainsi que des directives d'optimisation de sa conception qui vont nous aider pour le montage de notre convertisseur.

Un convertisseur DC-DC est inclus dans le système entre la charge et la source pour obtenir une puissance maximale transfert entre la source et la charge. Le convertisseur Boost est utilisé lorsque l'impédance de charge est inférieure à

l'impédance de la source. En modifiant le rapport cyclique du convertisseur pour chaque condition climatique (température et radiation.

Chapitre III :
**Poursuite du point de
puissance maximale**

1. Introduction :

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement Maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC/DC employés comme interface entrée générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance d'une manière permanente et ainsi faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximum (PPM) sans perte dans l'énergie transférée à l'aide d'un contrôleur MPPT, par conséquent, obtenir une puissance maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, Commencant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performants utilisant des algorithmes pour calculer le PPM du GPV, parmi les techniques les plus utilisées nous avons la méthode incrément de la conductance (IncCond) et perturber et observer (P&O) et "hillclimbing". [21]

2. Poursuite du point de puissance maximale :

L'amélioration du rendement du système PV nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV. Cela est possible si le point de fonctionnement est bien choisi en adaptant l'impédance de la charge à la source de tension. Le convertisseur DC-DC jouera le rôle d'un adaptateur d'impédance assurant ainsi le fonctionnement au point optimal qui permet de produire la puissance maximale du générateur PV[22].

Donc, la maximisation de puissance d'une source photovoltaïque, revient à chercher ce point de fonctionnement optimal. Cette commande est nommée suiveur du point de puissance maximale. Ces méthodes MPPT sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles sont basées sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV. La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant et de tension du module et la multiplication de ces deux grandeurs. Ces mesures sont

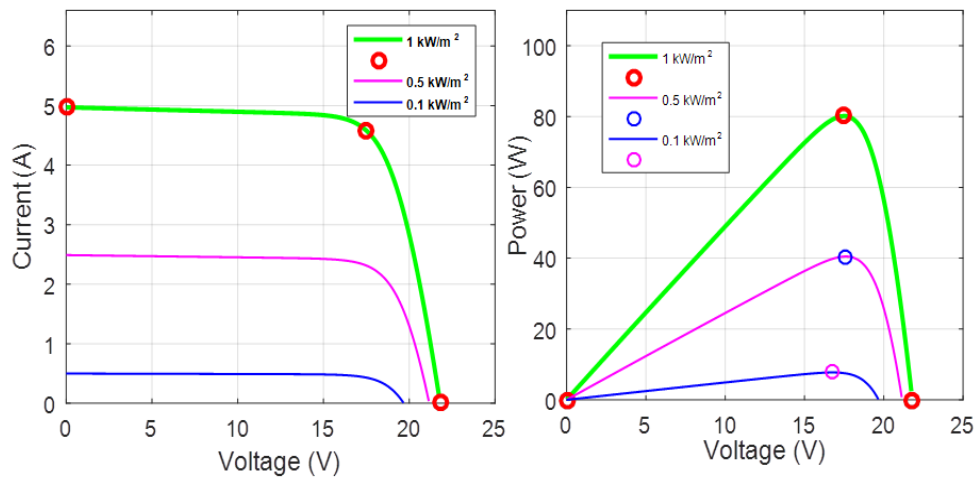
utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel. Il existe plusieurs types des commandes MPPT, parmi lesquels, on présente le principe des quelques méthodes MPPT, comme la méthode de la tension constante, la méthode du courant constant, l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation. Cette dernière méthode est utilisée dans notre travail à cause sa facilité d'implémentation.

3. Explications sur le MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

C'est un montage électronique au niveau du régulateur qui permet de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque. - Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% : pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [23].

4. Principe de fonctionnement de MPPT :

Un MPPT, de l'anglais «Maximum Power Point Tracking» est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. [24]



Figure(III-1) :La caractéristique I(V), P(V) et la trajectoire de PPM.

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un module

photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisies des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

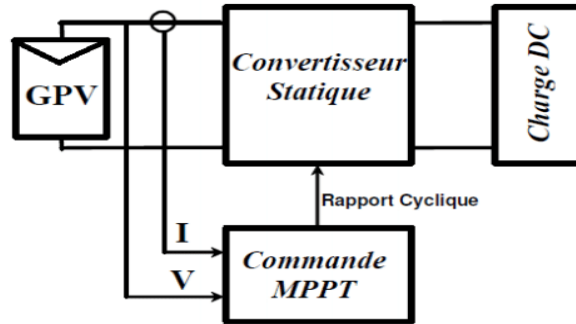
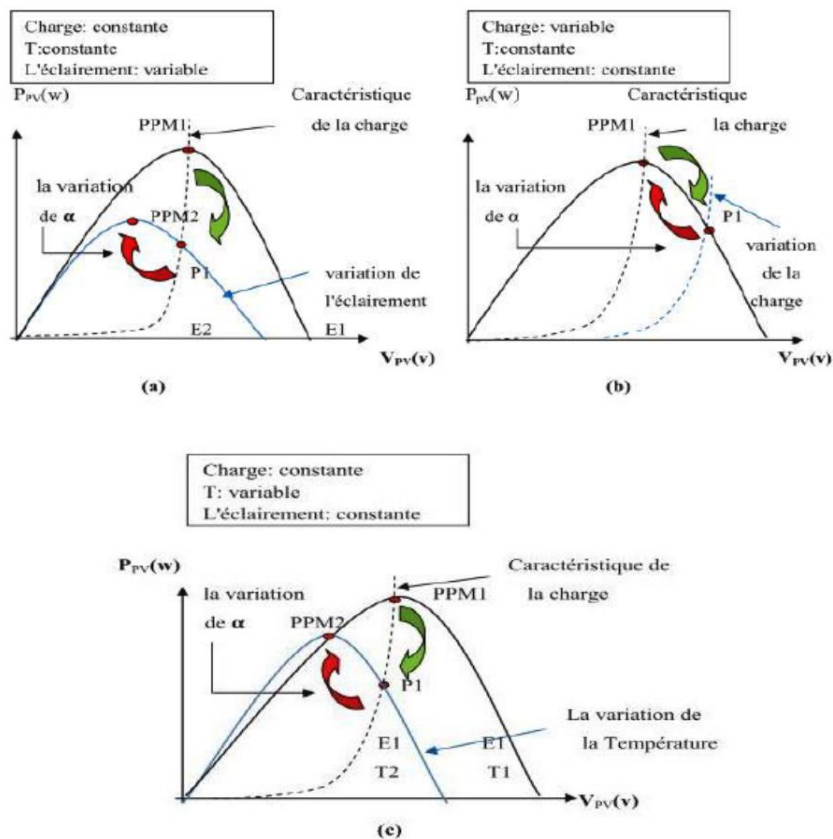


Figure (III-2) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.



Figure(III-3) : Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) l'influence de l'éclairement (b) l'influence de la charge (c) l'influence de la température

La figure(II.8) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ce cas est pour une variation de l'éclairement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximal PPM2. Dans le cas (b) pour une variation de la charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas (c) de variation de point de fonctionnement peut reproduire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [25].

5. Classification des commandes MPPT :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [26].

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

5.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée :

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectuent une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de PerturbObserve, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [26].

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

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des INC. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [26].

5.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :

5.2.1. MPPT Indirect :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur .Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques[27].

5.2.2. MPPT Direct :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de

recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [27].

6. Les Algorithmes MPPT :

6.1. Algorithme Perturber et observer (P&O) :

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k - 1)$.

Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [28] .

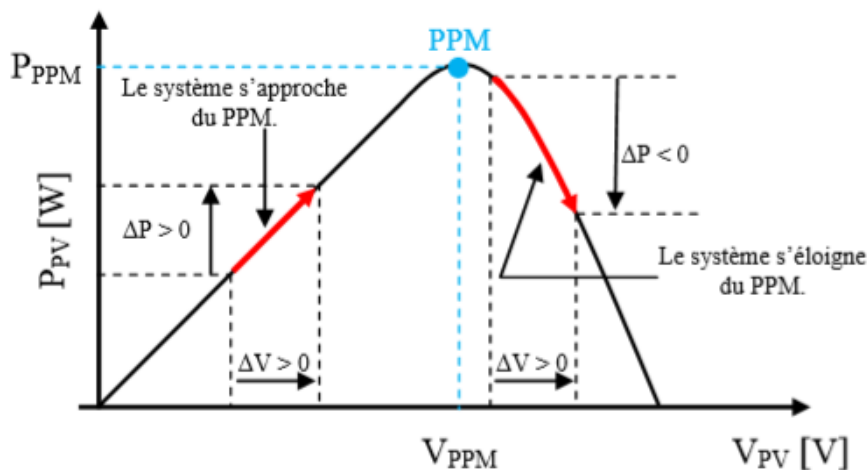


Figure (III-4) : Recherche du PPM par laméthode (P&O)

6.1.1. Avantages et limitations Perturber et observer (P&O):

- Algorithme simple et facile à mettre en œuvre.
- Bonne réactivité aux changements rapides des conditions d'irradiance.
- **Limitations:**

- Peut osciller autour du point de puissance maximale (MPPT) en raison des perturbations continues.
- Sensible aux conditions de faible irradiance, ce qui peut entraîner une perte de puissance.

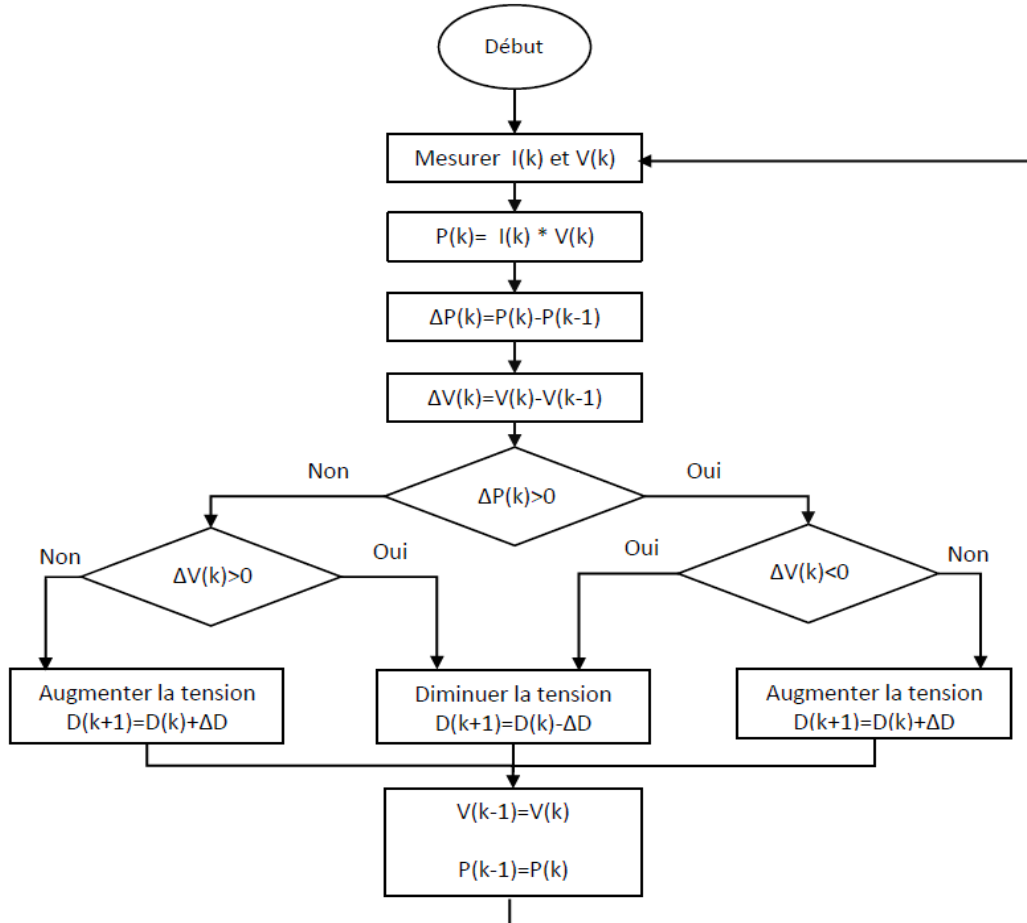


Figure (III-5) : Organigramme de l’algorithme ‘PO’.

6.2. Algorithme Incrément de la conductance (IncCond) :

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et sur l’incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale. Si l’incrément de conductance (dG) est supérieur à l’opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l’incrément de conductance est inférieur à l’opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu’à atteindre le point de puissance maximale [29].

6.2.1. Avantages et limitations Incrément de la conductance (In):

- Méthode plus précise et rapide pour atteindre le MPPT.
- Bonne réactivité aux variations de l'irradiance et de la température.
- **Limitations:**
- Nécessite une connaissance préalable des paramètres du module solaire pour un réglage optimal.
- Peut être sensible aux fluctuations rapides de l'irradiance, entraînant une instabilité

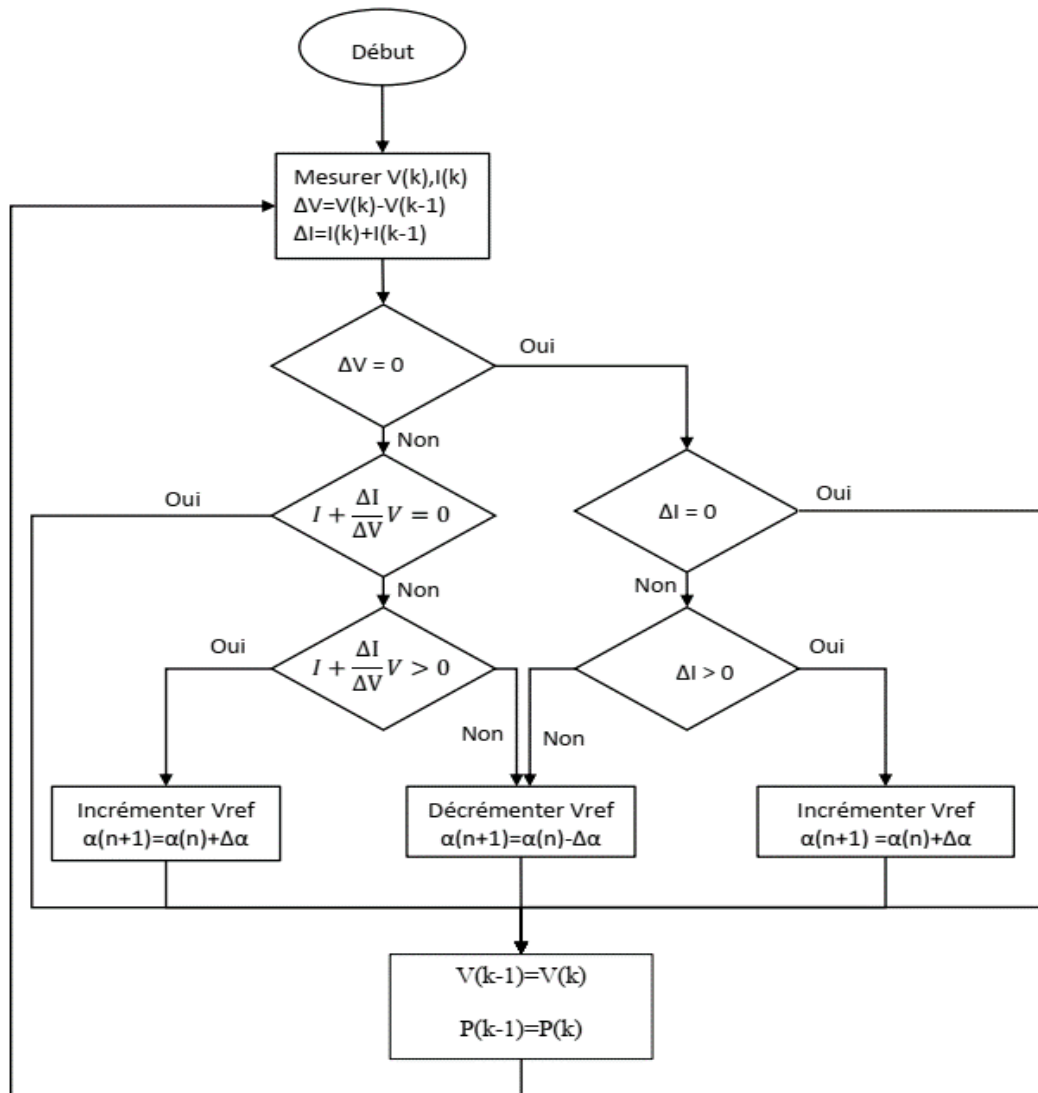


Figure (III-6) : Organigramme de l'algorithme 'INC'.

6.3. Algorithme "Hill Climbing":

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est l'un des techniques les plus utilise pour la commande MPPT grâce à sa simplicité à mettre en œuvre [30] mais elle possède des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte

occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques [31]. L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (II.11) [30].

Scope : correspond à une variable qui prend la valeur «1» ou «-1» suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau.

Périodiquement, la puissance de panneau est comparé à la valeur déterminée précédemment, en fonction du résultat de comparaison, le signe de la valeur Scope change ou reste identique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment [31].

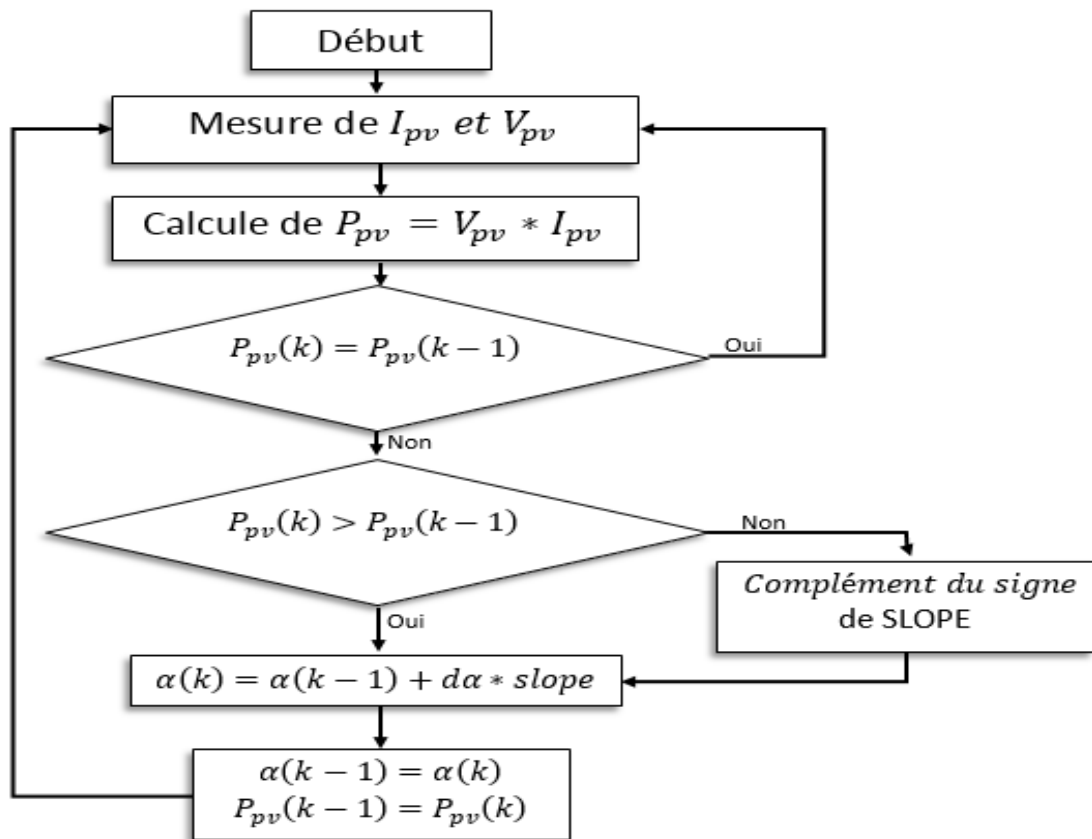


Figure (III-7) :Organigramme de l'algorithme Hill Climbing.

6.3.1. Avantages et limitations Hill Climbing (hc):

- Bonne capacité à atteindre le MPPT dans diverses conditions d'irradiance et de température.
- Fonctionne bien même en présence de bruit et de variations rapides des conditions.
- **Limitations:**

- Peut nécessiter plus d'itérations pour converger vers le MPPT, ce qui peut augmenter le temps de réponse.
- Sensible aux effets de hystérésis, ce qui peut entraîner une perte de puissance.

7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

Chapitre IV :
Simulation et Réalisation
de Système

1. Introduction :

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux pour la simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées.

La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Nous avons détaillé chaque méthode. Et on a fait modéliser l'ensemble de la chaîne de conversion sous MATLAB et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été simulé en utilisant trois méthodes Perturber et observer (P&O), Incrément de la conductance (In) et Hill Climbing (hc).

Ce dernier chapitre sera consacré à la réalisation d'un système photovoltaïque. Nous présentons en premier temps la carte Arduino UNO utilisée pour commander le système PV. Ensuite, on présente les différents composants du système, tel que le module Canadian Solar CS5C-80M, le convertisseur survolteur, le capteur de courant, le capteur de tension.

Enfin, nous faisons des simulations et des tests pratiques du système PV.

2. Simulation du système

Pour vérifier les performances des algorithmes proposés (P&O, INC, hc), la simulation du système PV illustrée à la figure IV.2 est développée et implémentée dans le logiciel MATLAB/Simulink®. Le générateur PV se compose d'un module PV (Canadian Solar CS5C-80M) de 80 W, comme illustré à la figure IV.1, les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module PV illustrées à la figure I.6 et au tableau IV.1 étant liste des paramètres des composants du convertisseur boost..

Module data

Module: Canadian Solar CS5C-80M

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
80.15	36
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
21.8	4.97
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
17.5	4.58
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.37399	0.088994

Figure (IV-1) : Données sur les caractéristiques électriques du module PV tirées de Matlab/Simulink

Convertisseur boost	Valeurs
Capacité d'entrée (Cin)	470 μ F
Inductance (L)	3.3 mH
Capacitance (C)	470 μ F
Résistance à la charge (R)	28 Ω

Table (IV.1) : Paramètre de convertisseur boost.

3. Schéma Matlab/Simulink dut simulation de système photovoltaïque :

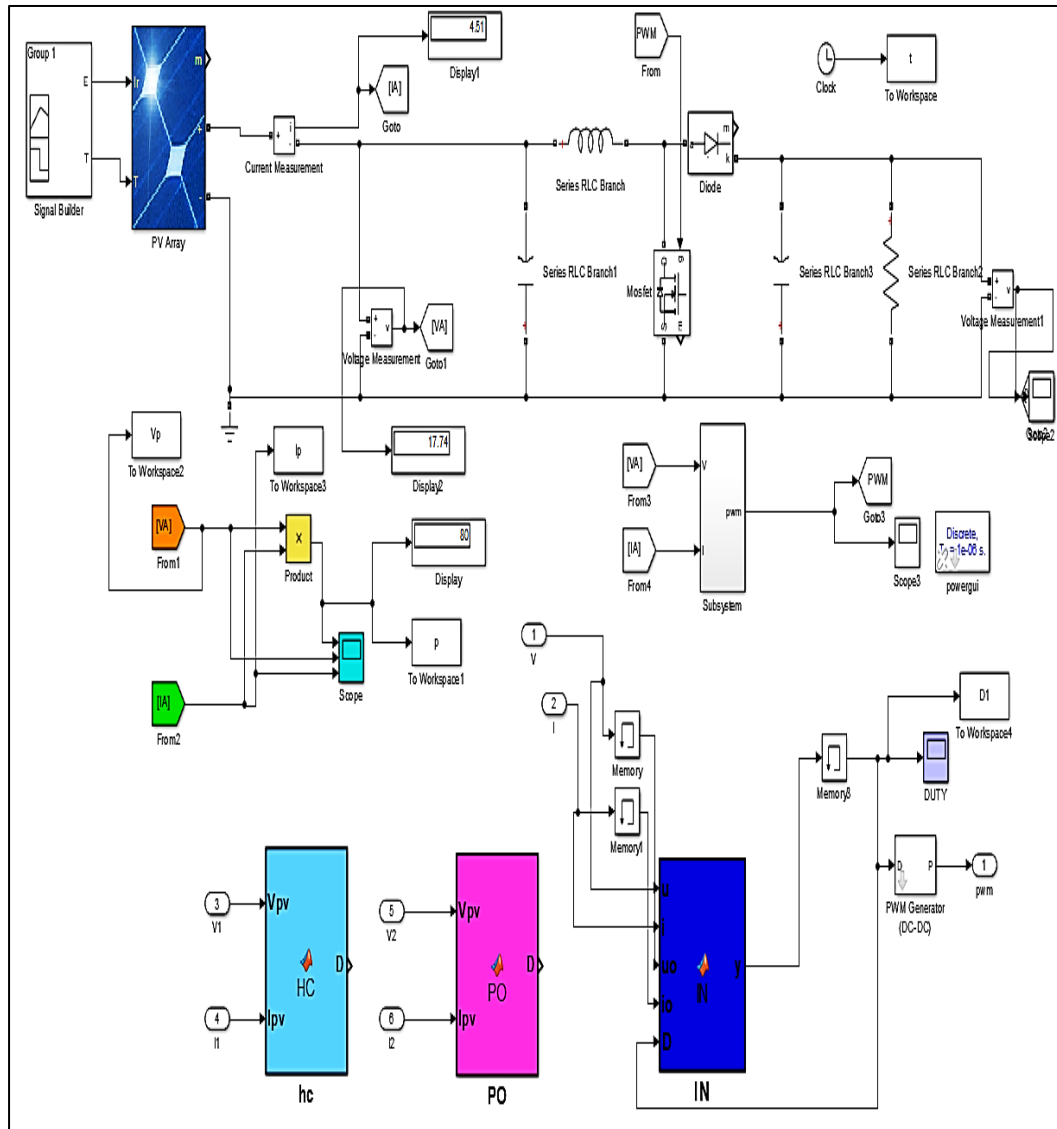


Figure (IV-2) : Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque avec les méthodes étudiées de MPPT.

4. Résultats de la simulation :

4.1. Algorithme IN (stable radiation) :

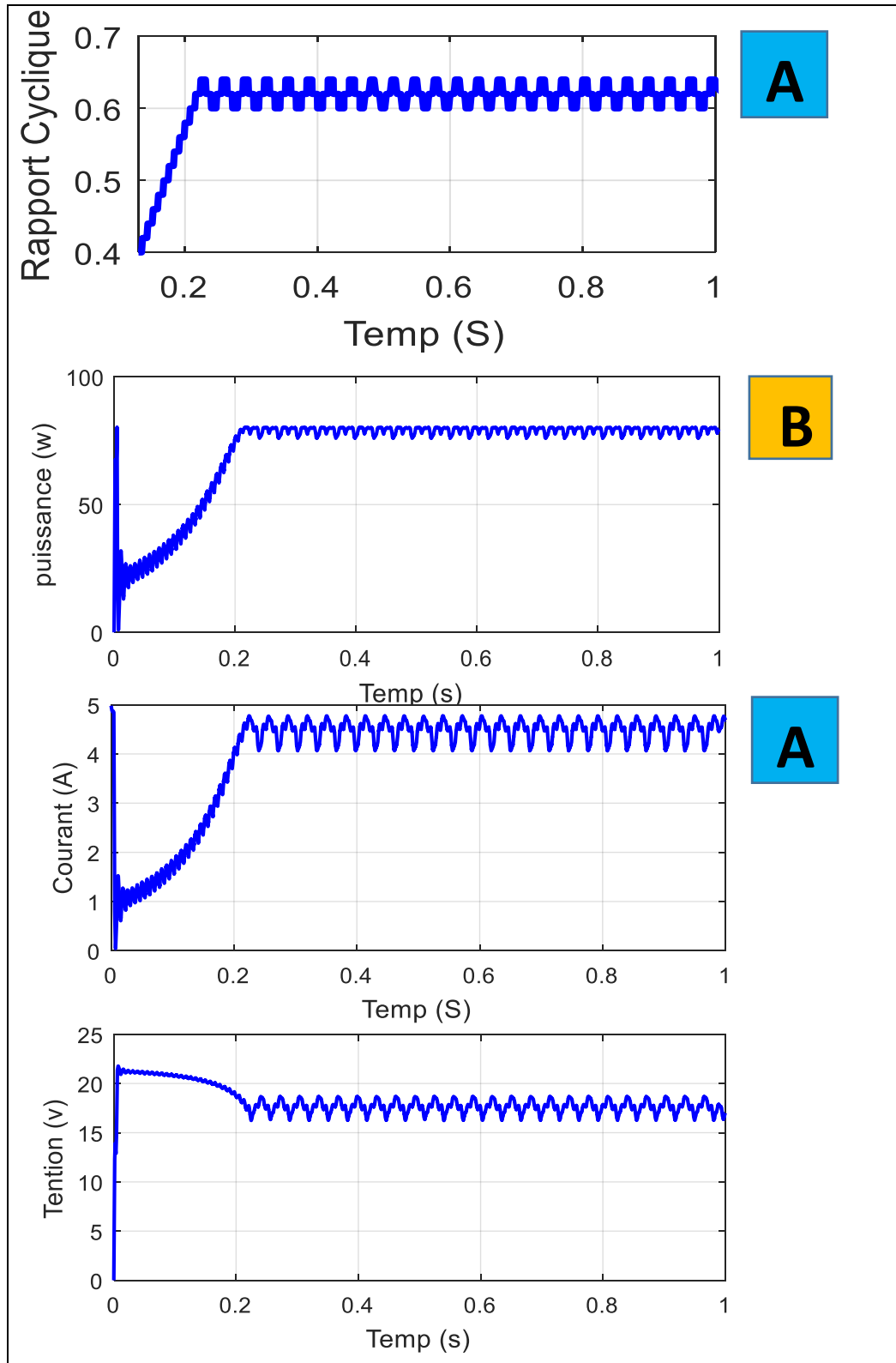


Figure (IV-3): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV et Résultat de simulation de : (A) courant PV (B) tension PV.

4.2. Incrément de conductance (variable radiation) :

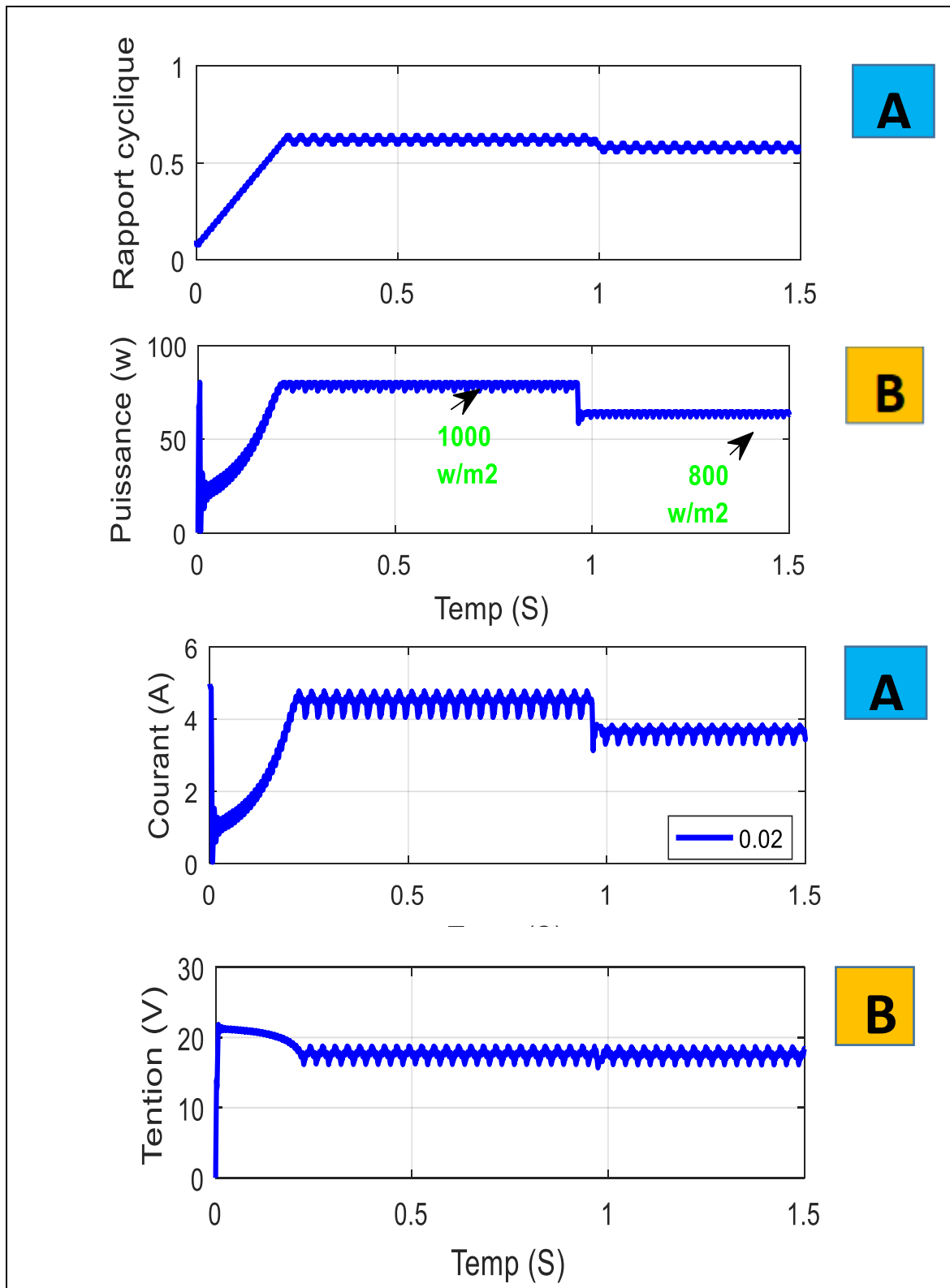


Figure (IV-4): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV et Résultat de simulation de : (A) courant PV (B) tension PV.

4.3. Hill Climbing(stable radiation):

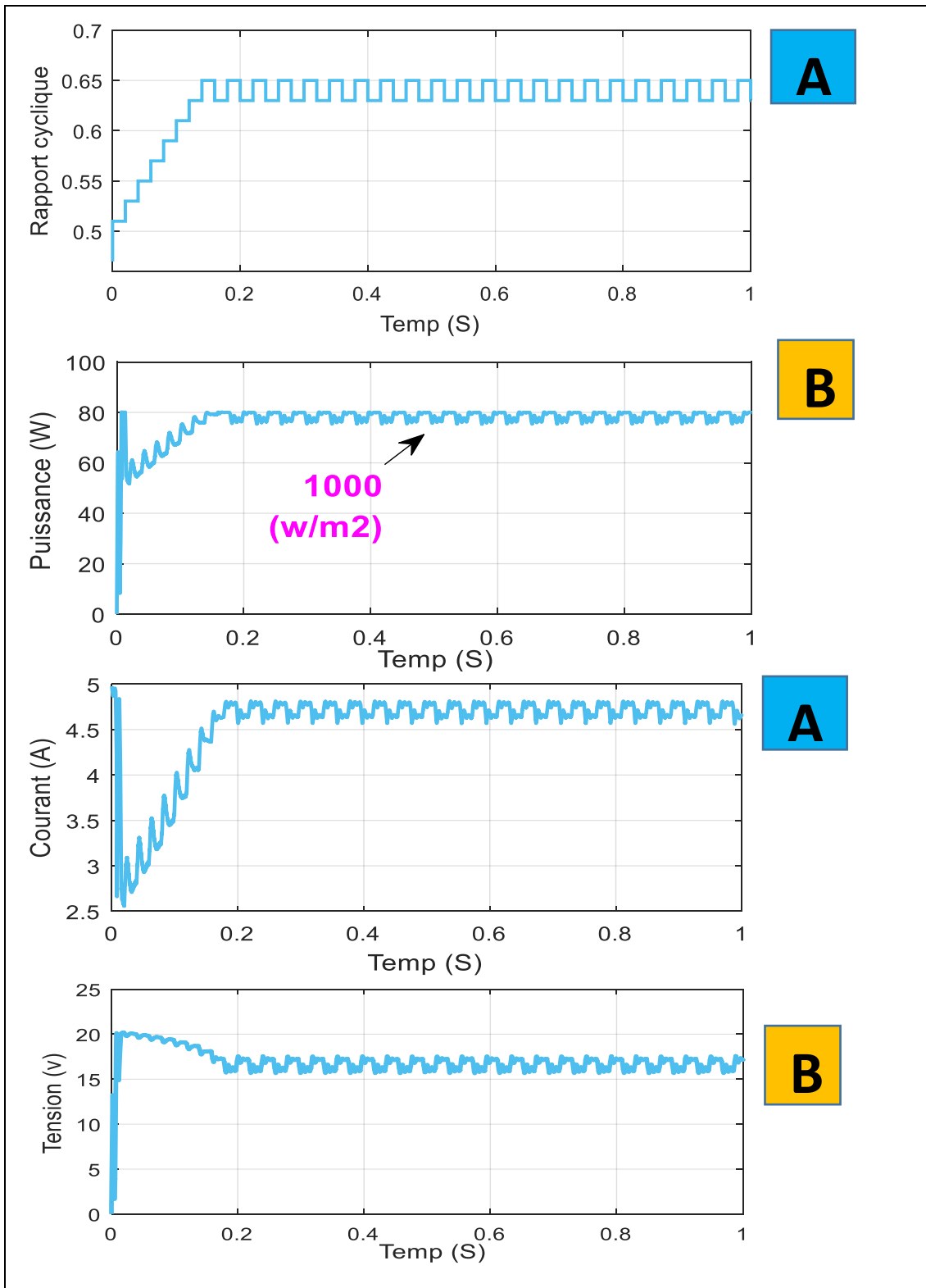


Figure (IV-7): (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et résultat de simulation de: (A) courant PV (B) tension PV

4.6. Hill Climbing(variable radiation):

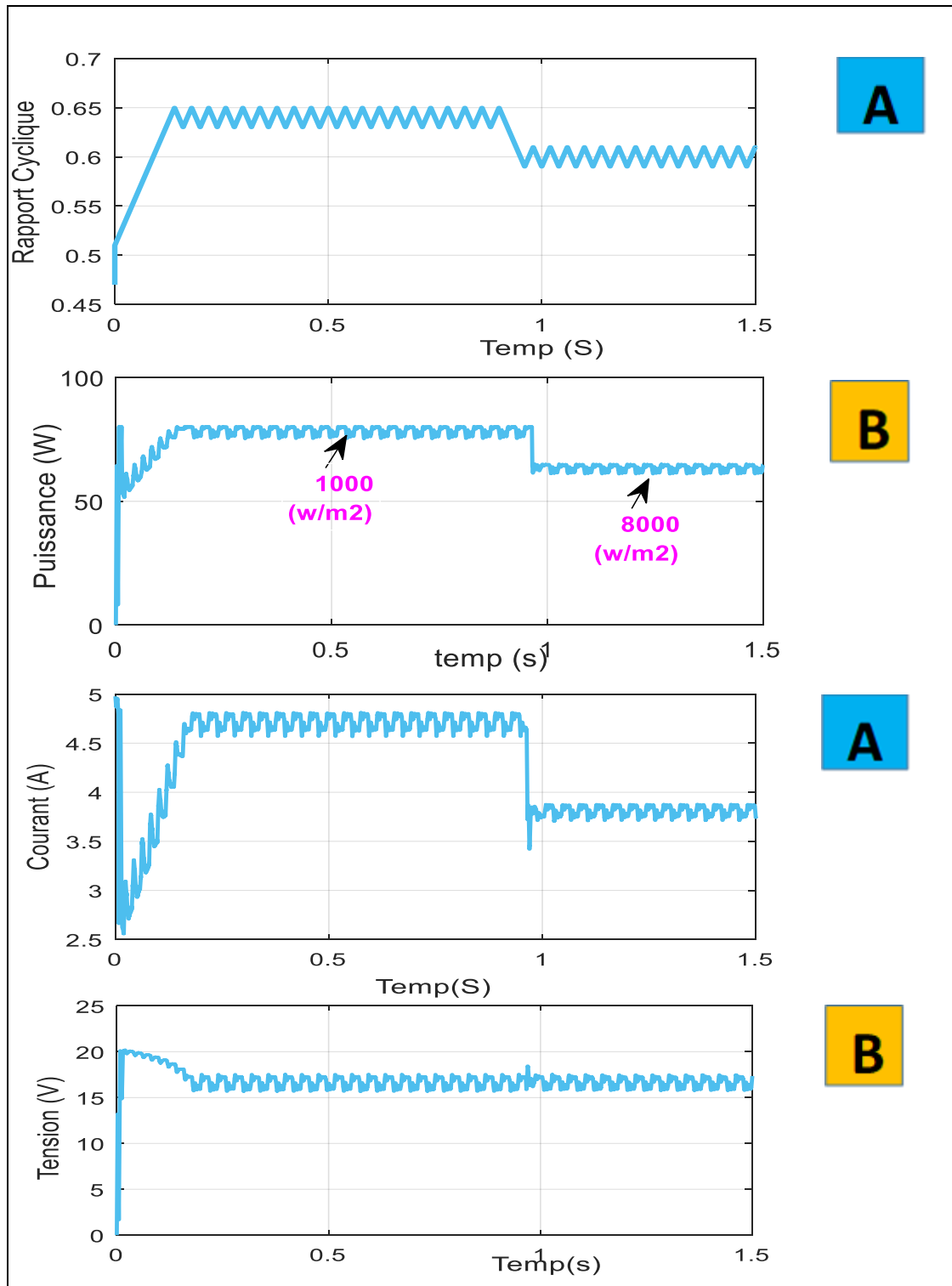


Figure (IV-8) (A) Rapport cyclique (B) Puissance PV. Et résultat de simulation de: (A) courant PV (B) tension PV.

4.7. Résultats de la simulation des formes d'onde de suivi MPP:

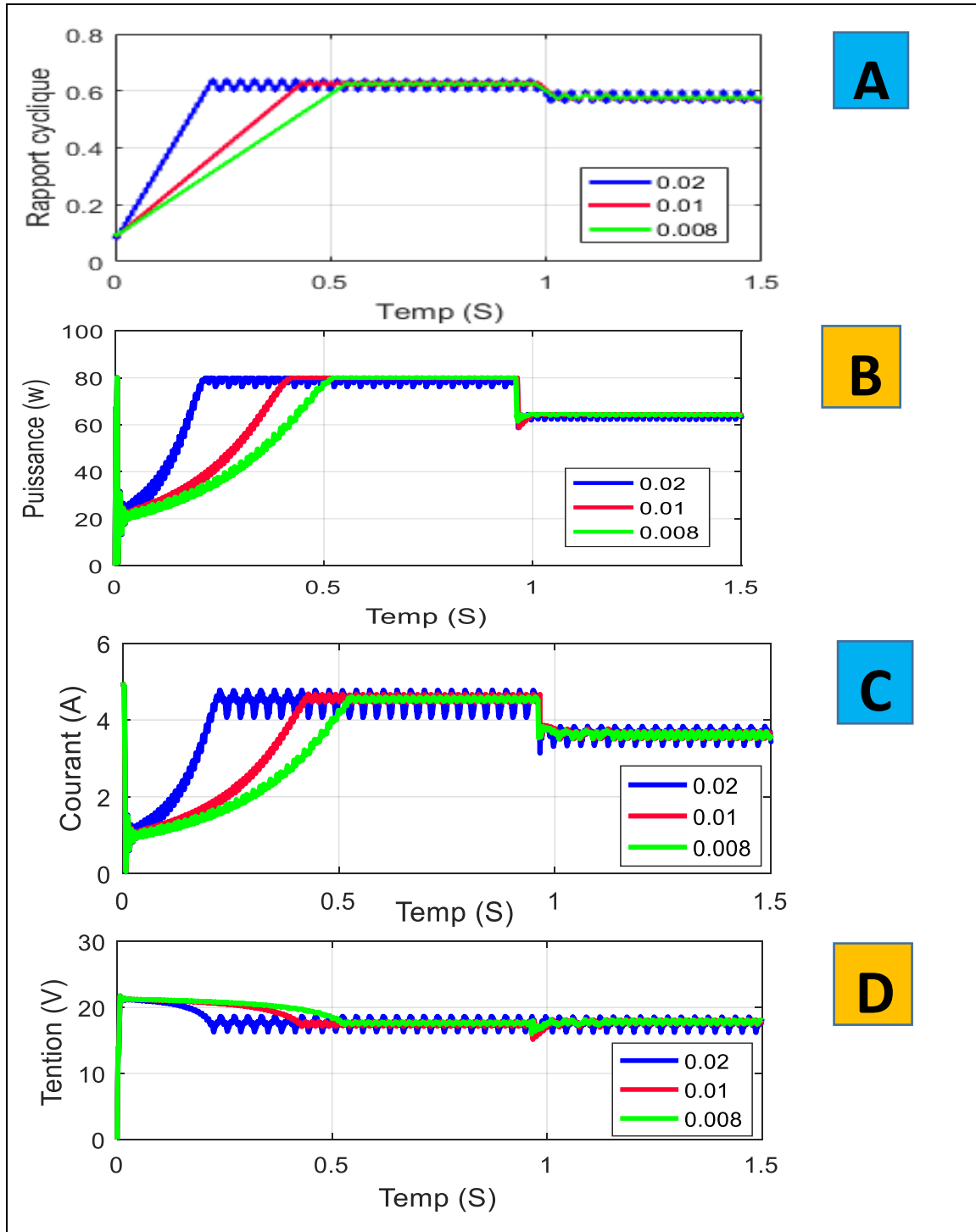


Figure (IV-9) – Résultats de la simulation des formes d'onde de suivi MPP : (A) rapport cyclique, (B) puissance PV, (C) courant PV et (D) tension PV pour le fonctionnement en régime permanent avec deux facteur de mise à l'échelle MPPT: (bleu) IN basé sur 0.02 et (rouge) IN basé sur 0.0045 et (vert) IN basé sur 0.008.

5. Matériel utilisé:

5.1. L'Arduino:

L'Arduino est une famille de cartes électronique à microcontrôleur open-source née en Italie en 2005. Ces cartes basées sur une interface entrée/sortie simple et sur un environnement de développement proche du langage C [32].

La carte Arduinouno est la première version stable de carte Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation.

Elle utilise une puce ATmega328P cadencée à 16 Mhz. Elle possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2ko de SRAM (mémoire vive) et 1 ko d'EEPROM(mémoire morte destinée aux données) [32].

Elle offre 14 pins (broches) d'entrée/sortie numérique (donnée acceptée 0 et 1) dont 6 pouvant générer des PWM (Pulse width Modulation). Elle permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces 6 entrées analogiques. Chaque broche est capable de délivrer un courant de 40 mA pour une tension de 5V. Cette carte Arduino peut aussi s'alimenter et communiquer avec un ordinateur grâce à son port USB. On peut aussi l'alimenter avec une alimentation comprise en 7V et 12V grâce à son connecteur Power Jack[32].

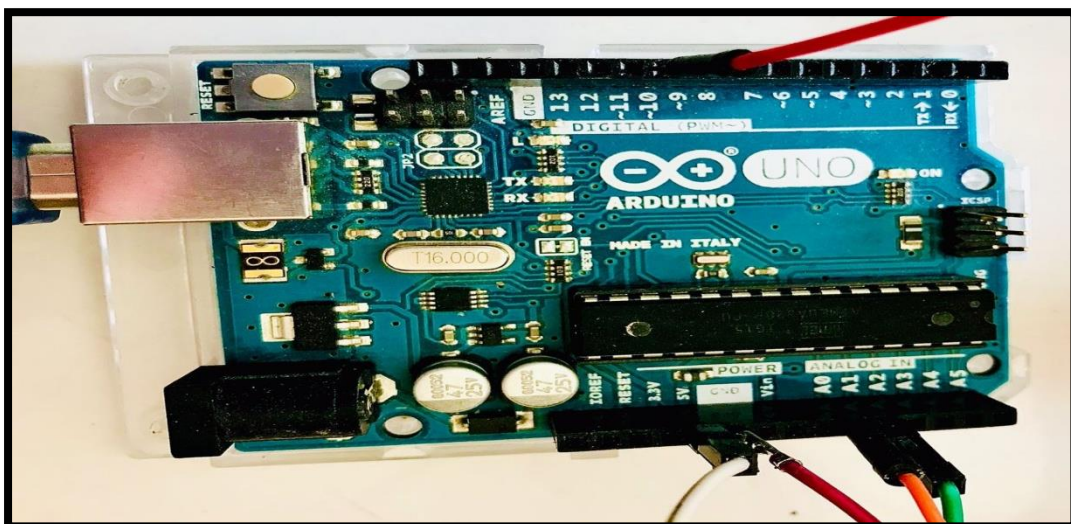


Figure (IV-10) :Photo réel Arduino UNO

Categorie	Valeur
Microcontrôleur	Atmega 328P
Operating voltage	5v
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input voltage (limit)	6-20
Digital I/O Pins	14(of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O pins	6
Analog Input pins	6
DC Current per I/O pin	20mA
DC Current for 3.3pin	50mA
Flash Memory	of which 0.5 KB used by bootloader (Atmega328p) 32×
Led-BUILTIN	13
Length	636mm

Table (IV-2) : la carte arduinoUNO.

5.2. Le panneau solaire :

On a utilisé le panneau solaire de la paillasse du laboratoire 22.5V ,80W qu'est illustré par la figure (IV-11)



Figure (IV-11): Photo réel panneau PV et Plaque signalétique du panneau PV

5.3. Convertisseur Boost et circuit de controle de convertisseur:

Boost Converter se compose de :

- Deux condensateurs $C_{in} = 470\mu\text{f}$, $C_{out} = 470\mu\text{f}$, connecté aux bornes du module

Utilisé pour convertir la tension d'entrée en une tension de sortie plus élevée :

- Inductance : $L = 3.3\text{mH}$.
- MOSFET IRF830.

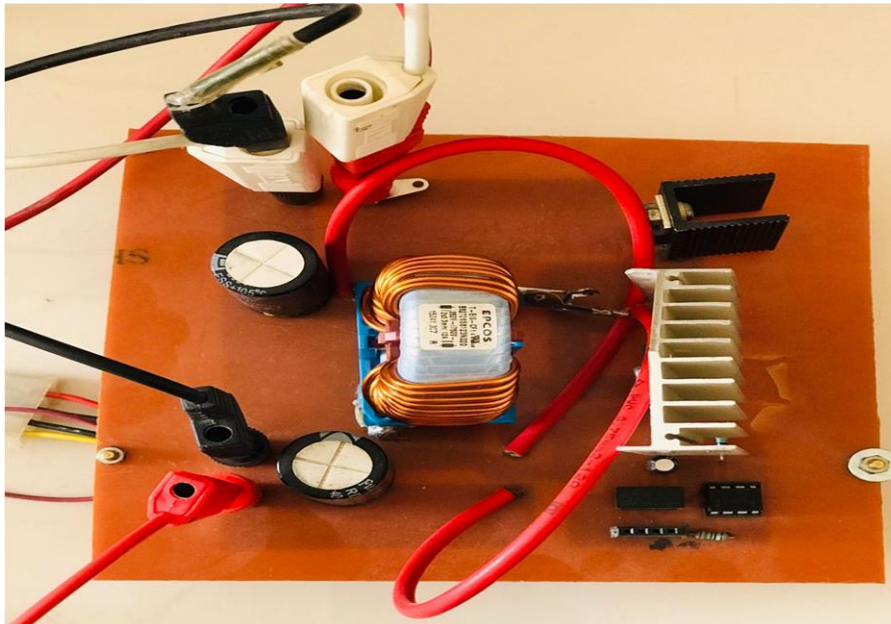


Figure (IV-12) : Photo réel de convertisseur Boost.

5.4. Capteur de courant

Un capteur de courant, également connu sous le nom de capteur de courant électrique, est un dispositif utilisé pour mesurer l'intensité du courant électrique circulant dans un circuit. Il permet de convertir le courant en une quantité proportionnelle généralement sous forme d'un signal électrique ou d'une valeur numérique.

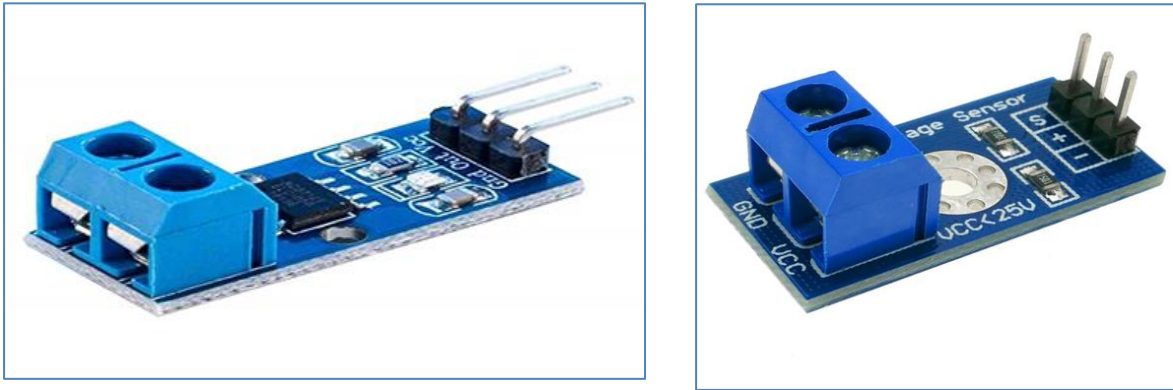


Figure (IV-13) : Capteur de courant et Capteur de tension.

5.5. Capteur de tension

Un capteur de tension, également connu sous le nom de capteur de tension électrique ou de capteur de tension continue, est un dispositif utilisé pour mesurer la tension électrique présente dans un circuit électrique. Il convertit la tension appliquée en une quantité proportionnelle généralement sous forme d'un signal électrique ou d'une valeur numérique.

6. Réalisation du système :

Dans cette partie, un système efficace de suivi de point de puissance maximale basé sur arduino / matlab utilisant un véritable panneau photovoltaïque est conçu. Nous présenterons les résultats expérimentaux de l'expérience, en travaillant avec PO et INCet HC.

Nous avons fait un vrai test de mesure du jour ensoleillé et du faux panneau ombragé pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée dans des conditions climatiques variables.

L'utilisateur n'a pas besoin de faire de programmation dans Arduino IDE. Tout sera fait dans Simulink à l'aide de S-functionbuilder. Cette solution consiste d'une part à utiliser les fonctions offertes par Simulink qui permet d'envoyer et d'acquérir des données via le port séri(USB) et d'autre part de traiter et visualiser ces données en temps réel.

Aussi, nous avons besoin de faire en sorte que la sortiearduino PWM atteigne 20 kHz au moins parce que arduino à l'aide d'un code spécial.

Chapitre IV: Simulation et Réalisation de Système

Entrée matérielle, où les capteurs de V_{pv} et I_{pv} seront lus à l'aide d'arduino.

Traitement des données par l'algorithme d'MPPT et transférer le signal(PWM) de contrôle au convertisseur boost.



Figure (IV-14) :photo réel de système photovoltaïque.

7. Résultats pratique :

7.1. Incrément de la conductance (I_n) :

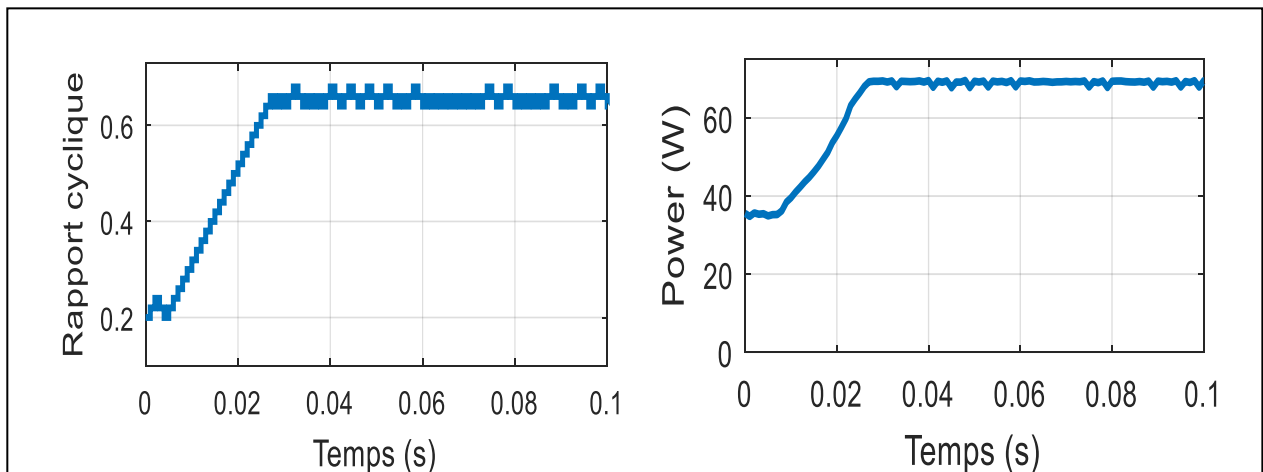


Figure (IV-15) : Résultat pratique des algorithmes utilisés.

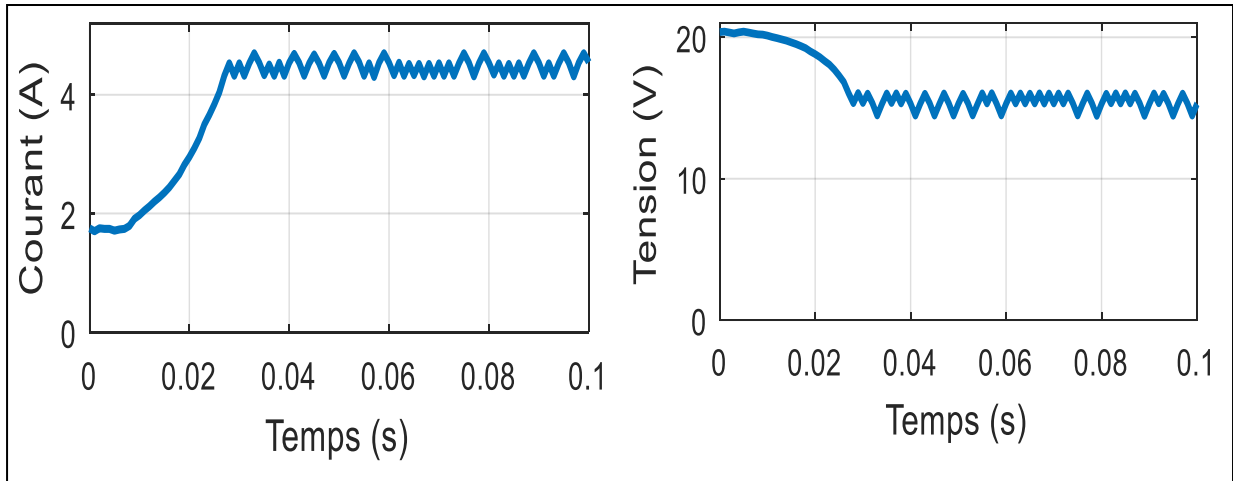


Figure (IV-16): Résultat pratique des algorithmes utilisée.

7.2. Perturber et observer (P&O) :

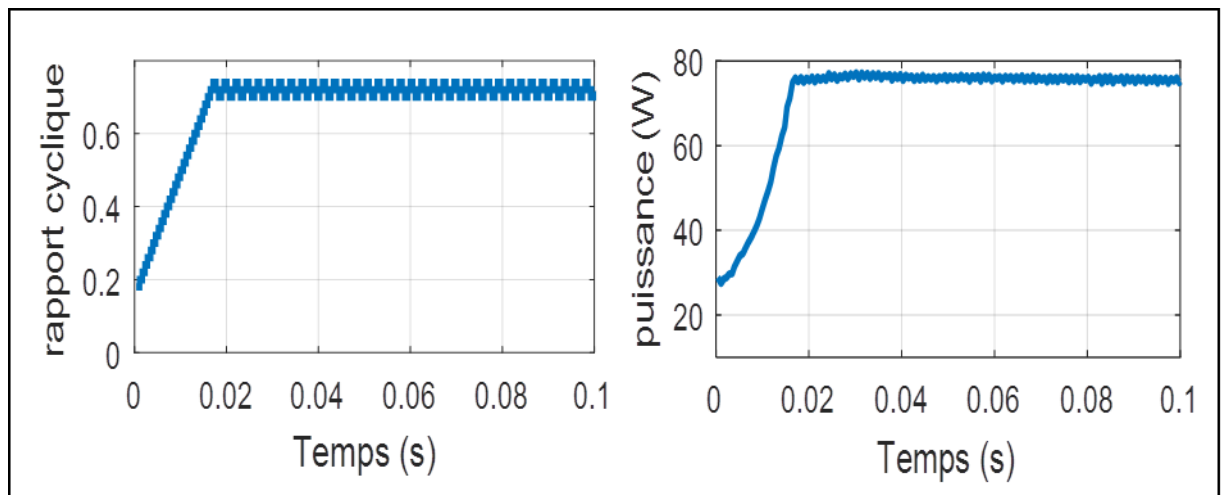


Figure (IV-17): Résultat pratique des algorithmes utilisés.

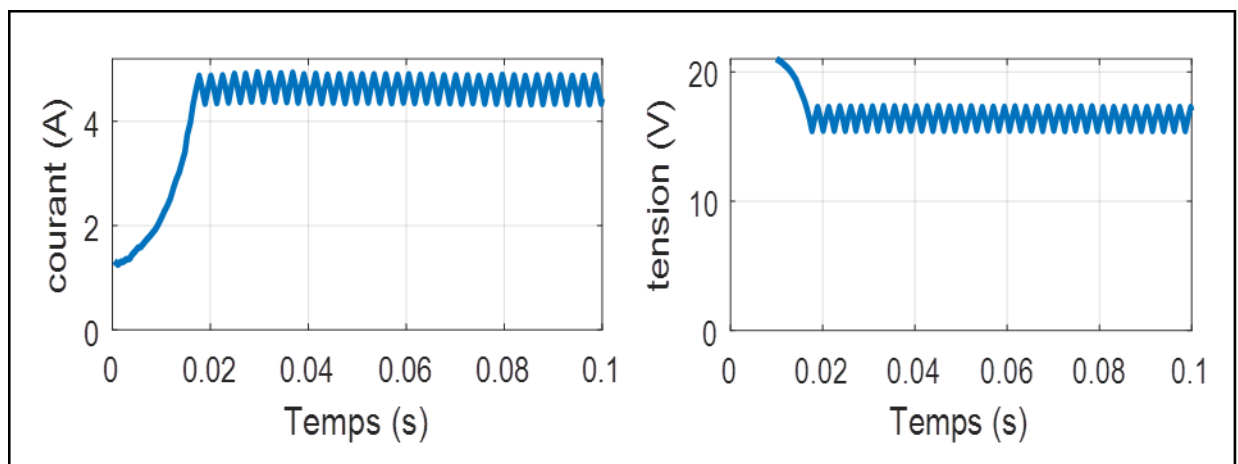


Figure (IV-18) : Résultat pratique des algorithmes utilisés.

7.3. Hill Climbing (hc) :

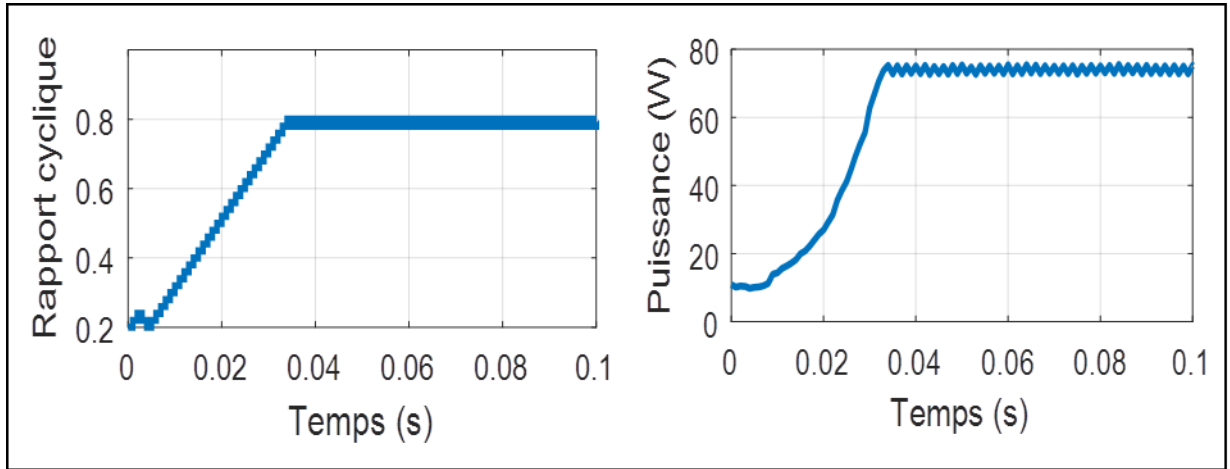


Figure (IV-19) : Résultat pratique des algorithmes utilisés.

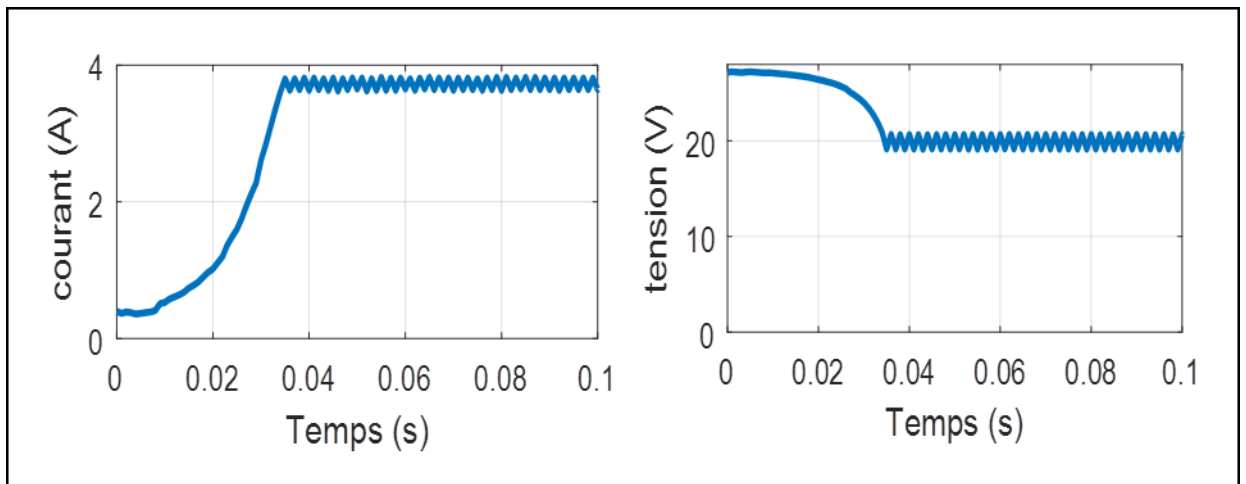


Figure (IV-20) : Résultat pratique des algorithmes utilisés.

8. Discussion générale de résultats :

Les résultats pratiques montrent que les trois méthodes MPPT (Perturber et observer (P&O), Incrément de la conductance (In) et Hill Climbing (hc)) peuvent être efficaces pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) dans différents scénarios.

9. Conclusion :

En conclusion, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est d'une importance capitale dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser leur rendement énergétique. Les différentes méthodes MPPT, telles que Perturber et observer (P&O), Incrément de la conductance (In) et Hill Climbing (hc), offrent des approches variées pour atteindre cet objectif.

L'application pratique de ces méthodes MPPT a montré des résultats prometteurs. L'algorithme Perturber et observer (P&O) se distingue par sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre, bien qu'il puisse souffrir d'une certaine instabilité. L'algorithme Incrément de la conductance (In) offre une précision accrue et une meilleure réactivité aux variations des conditions, mais nécessite une connaissance préalable des caractéristiques du module solaire. L'algorithme Hill Climbing (hc), quant à lui, se démarque par sa robustesse et sa capacité à s'adapter à des conditions changeantes.

D'après la simulation et les résultats expérimentaux, on peut conclure qu'avec le proposé algorithme, le panneau PV peut fournir la puissance maximale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de

commandes MPPT ont été étudiées pour la poursuite du point maximum de puissance.

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. Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour

l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement.

On a

présenté la méthode MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme la

méthode 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. Le travail présenté dans cette thèse porte sur la simulation et la mise en œuvre d'un système photovoltaïque alimenté par un convertisseur BOOST. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un amplificateur de tension, ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements de temps et ainsi d'extraire le maximum de puissance disponible à la charge. La simulation et les résultats expérimentaux

montrent que le dispositif s'intéresse à la détection de la puissance absolue. Les algorithmes PO, INC et HC sont choisis pour être implémentés dans la carte Arduino UNO, afin de suivre le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la puissance maximale. Selon la simulation et les résultats expérimentaux, on

Conclusion générale

peut conclure qu'avec les algorithmes proposés, le panneau PV peut économiser la puissance maximale.

Référence

Référence

- [A] BOUALEM, DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007
- [B] S. NAOUAL, « Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [C] M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectées au réseau électrique », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas –Sétif ,2012.
- [D] <http://www.outilesolaires.com/glossaire/images/azimut.gif>.
- [1] N. Achaïbou, « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque », rev. Energ. Ren: Valorisation (1999) 1-6, 1999.
- [2] D. Boukhers, « optimisation d'un system d'energie photovoltaïque application pompage », mémoire de magistère, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [3] N. Touil et S. ghenbazi, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [4] Bencherif Mohammed. « Modélisation de système énergétique photovoltaïque et éoliens intégration dans système hybride base tension ». Thèse de Doctorat en physique, Université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2014.
- [5]: Dégela M.L et Ben Ahmed .B "Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque "UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA .master 2017.
- [6] M. Belhadj Mohammed « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » Mémoire de Magister, centre universitaire de Bechar, 2008.
- [7]: Mr MEKKAOUI Saddam, Mr DHIF Souhaib & Mr CHEKIMA Ahmed Yahia. (Conception, simulation et réalisation d'un régulateur solaire avec commande MPPT à base d'une carte Arduino) M.A. UNIVERSITE Echahid Hama Lakhdar- EL Oued. 2021/2022.

- [8]: NAKES Abdelkader, GHERBI Abderraouf "la commande MPPT basée sur les algorithmes pattern search (PS) pour les systèmes photovoltaïques," MASTER ACADEMIQUE, L'Université EchahidHamma Lakhdar d'El Oued, Année universitaire: 2021/2022.
- [9]: Souid Saber. Mecheri Salah Eddine. Nini Idris. (Simulation and Realization of MPPT methods in photovoltaic system) MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE EchahidHammaLakhdar- EL Oued 2020/2021.
- [10]: Mr MEKKAOUI Saddam, Mr DHIF Souhaib & Mr CHEKIMA Ahmed Yahia. (Conception, simulation et réalisation d'un régulateur solaire avec commande MPPT à base d'une carte Arduino) M.A. UNIVERSITE EchahidHamma Lakhdar- EL Oued. 2021/2022.
- [11]: Hanine Mounir, Kebir Allel. "Etude et simulation d'un étage MPPT pour un générateur photovoltaïque à base d'un kit Arduino" UNIVERSITE d'ADRAR. master le : 25 Mai 2017.
- [12] M. S Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de master, Université Ferhat Abbas – Setif, 2011.
- [13] S. Ghandour, « Conception de convertisseurs DC/DC à base de MEMS. Micro et nanotechnologies/Micro électronique », these de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [14] J. D. Irwin, Control in power electronics : selected problems. Elsevier, 2002.
- [15] R. M'HAMMEDI, C. BEN AMRANI, B. ATAÏLLAH et al., "Étude techno-économique d'un système photovoltaïque (maison solaire) sur le site d'adrar," Ph.D. dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2020.
- [16] L. Abbassen, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [17] M. Bentoumi, (Poursuite du Point Maximale d'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Intelligentes), MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, JUIN 2016.
- [18] Mr TARGANT Lyes & Mr KHALEF Sofiane (Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique), Mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.

- [19]Sahraoui Hocine ,(Etude et simulation d'un système de chauffage photovoltaïque), MÉMOIRE DE MASTER,Université Mohamed Khider Biskra M'SILA, JUIN 2016.
- [20]AIT-CHEIKH, SALAH MOHAMED, "Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques," Ecole Nationale Polytechnique
- [21] S. ABBOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques », thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et université de Sfax, 2015.
- [22] R. Touahir et M. A. K. Ben Zahia, « contrôleur neuronal pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque », Mémoire master, Université KasdiMerbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [23] [En ligne]. Available: <http://energie28.blogspot.com/2016/11/definition-etexplications-sur-le-mppt.html>.
- [24] B. O, Mémoire de Master, «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque,» Université de Ouargla, Ouargla, Algérie, 2011.
- [25] A. A. Azi, Mémoire de Magister, «Contribution au développement d'un outil d'aide audiagnostic de performances des MPPT dans la chaîne de conversion photovoltaïque,»Université de M'sila, Algérie, 2014.
- [26]M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [27]R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [28]commande MPPT pour un système photovoltaïque", Tunisie: Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) , 2013.
- [29] A. A. Ghassami, S. M. Sadeghzadeh, and A. Soleimani, "A high performance maximum power point tracker for pv systems," International Journal of Electrical Power &Energy Systems, vol. 53, pp. 237–243, 2013.
- [30]A. e. A. BENSLIMANE, "A comparative study between hill climbing algorithm and fuzzy logic controller algorithm of MPPT for GPV system",EasyChairpreprint, 2020.

- [31] C.CABAL, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.», Thèse Doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE.
- [32] A. Ahmed Azi, « Contribution au développement d'un outil d'aide au diagnostic de performances des MPPT dans la chaîne de conversion photovoltaïque », Mémoire magister, Université de M'sila, Algérie, 2014.