

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université, BLIDA_1

Faculté de Technologie

Département des Energies Renouvelables.



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme
MASTER EN ENERGIE RENOUVELABLE.

Option : Conversion Photovoltaïque.

Thème :

**Étude et Simulation d'un Système PV Autonome Muni d'un
Contrôleur MPPT pour une Meilleur Gestion d'énergie**

Par : GAOUAOUI Imène.

Soutenu le 04/07/2023 devant le jury composé de :

Mr. DOUMAZ Toufik	M.A.A	USDB1	Président
Dr .BRADAI Rafik	M.C.A	USDB1	Examineur
Dr. BENZETTA Abdelhalim	M.C.B	EST	Encadreur
Dr .BOUKENOUI Rachid	M.C.B	USDB1	Co-Encadreur

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant, de m'avoir donné la santé, la force et le courage d'accomplir ce travail.

*Je tiens à remercier vivement mon promoteur le **Dr BENZETTA Abdelhalim** pour sa disponibilité, ses précieux conseils et pour son aide remarquable.*

*Toute ma profonde gratitude exprimée pour mon co-promoteur le **Dr BOUKENOUI Rachid** pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son aide et sa patience pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à remercier **Dr Bouzaki Mohammed Moustafa** chef du département Energies renouvelables, pour sa disponibilité, ses conseils, ses orientations et ses encouragements, tout au long de notre formation.*

Mes vifs remerciements vont aux membres du jury qui nous ont honorés en acceptant d'évaluer et juger mon travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma mère et mon père,

À mes chers frères,

À mes chères sœurs,

À Khali Houssine, et sa petite famille,

À toute ma famille,

À ma petite précieuse fille FARAH.

Imène

الملخص: من بين إحدى أهم المشكلات الرئيسية عند تصميم نظام الكهروضوئية هي نقل الطاقة القصوى من المولد الكهروضوئي GPV إلى الشحنة. إلا أن إدراج مرحلة المطابقة بين GPV والشحنة يحسن نقل الطاقة. وبالتالي، فإن هذه المرحلة هي عبارة عن محول DC / DC، يتم التحكم فيه بواسطة MPPT (تتبع أقصى نقطة الطاقة)، مما يجعل من الممكن البحث بشكل دائم عن أقصى نقطة للطاقة التي توفرها الوحدة الكهروضوئية. الهدف من هذا العمل هو دراسة ومناقشة نوعين من تقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، وهما: الاضطراب والملاحظة (P&O)، وزيادة التوصيل (INC). تم استخدام بيئة Matlab-Simulink لتحليل ثم تفسير نتائج المحاكاة لهذه الخوارزميات، وبالتالي إظهار أداء وحدود كل خوارزمية

الكلمات الرئيسية: المولد الكهروضوئي GPV، محول DC/DC Boost، تتبع نقطة الطاقة القصوى
Matlab-Simulink، MPPT(P&O, INC)

Résumé : L'une des principales problématiques lors de la conception d'un système PV est le transfert d'un maximum de puissance depuis le générateur photovoltaïque GPV vers la charge. Cependant, l'insertion d'un étage d'adaptation entre un GPV et une charge optimise le transfert d'énergie. Ainsi, cet étage est un convertisseur DC/DC, commandé par une MPPT (Maximum Power Point Tracking), permet de rechercher en permanence le point maximum de puissance délivrée par le module PV. L'objectif de ce travail est d'étudier et discuter deux types de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), à savoir : Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la conductance (INC). L'environnement Matlab-Simulink est utilisé pour analyser, puis interpréter les résultats de simulation de ces algorithmes, et par conséquent, montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

Mots clés : générateur photovoltaïque GPV, convertisseur DC/DC Boost, la commande MPPT (P&O, INC), Matlab-Simulink.

Abstart : One of the main issues when designing a PV system is the transfer of maximum power from the photovoltaic generator GPV to the load. However, the insertion of an adaptation stage between a GPV and a load optimizes the energy transfer. Thus, this stage is a DC/DC converter, controlled by an MPPT (Maximum Power Point Tracking), allows permanently to seek the maximum point of power delivered by the PV module. The objective of this work is to study and discuss two types of Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques, namely: Perturbation and Observation (P&O), Increment of Conductance (INC). The Matlab-Simulink environment is used to analyze and then interpret the simulation results of these algorithms, and therefore, show the performance and the limits of each algorithm.

Keywords: photovoltaic generator GPV, DC/DC Boost converter, Maximum power point tracking MPPT(P&O, INC), Matlab-Simulink.

Table des matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I: Généralité sur les chaînes de conversion photovoltaïque	4
<i>I.1 Introduction</i>	5
<i>I.2 Le gisement solaire</i>	5
I.2.1 Énergie solaire en l'Algérie.....	5
I.2.2 Le rayonnement solaire	7
<i>I.3 Le photovoltaïque</i>	8
I.3.1 Historique.....	8
I.3.2 L'effet photovoltaïque	8
<i>I.4 Cellule photovoltaïque.....</i>	9
I.4.1 . Structure d'une cellule.	10
I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule	10
I.4.3 Différents types de cellules	11
I.4.3.1 Les cellules solaires à base de Silicium	11
I.4.3.2 Autre technologies ;.....	12
<i>I.5 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.....</i>	12
I.5.1 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque	14
I.5.1.1 Le courant de court-circuit I_{cc}	14
I.5.1.2 La tension en circuit ouvert V_{co}	14
I.5.1.3 Facteur de Forme FF.....	14
I.5.1.4 Le rendement η	15
I.5.1.5 Le point de puissance maximale (PPM)	15
<i>I.6 Le générateur photovoltaïque.....</i>	15
I.6.1 Regroupement des cellules en série.....	15
I.6.2 Regroupement des cellules en parallèle :	16
I.6.3 Regroupement des cellules en série/parallèle.....	16
<i>I.7 Les différents types des systèmes PV.....</i>	17
I.7.1 Les systèmes autonomes	18
I.7.1.1 Systèmes autonomes au fil du soleil	18
I.7.1.2 Les systèmes avec stockage	19
I.7.2 Systèmes PV à injection aux réseaux	20
I.7.2.1 Systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque).....	20
I.7.2.2 Systèmes à petite puissance ou systèmes décentralisés	20
<i>I.8 Conclusion.....</i>	21
CHAPITRE II: MODELISATION ET SIMULATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE... 22	22
<i>II.1 Introduction</i>	23
<i>II.2 Modélisation et simulation du module PV ET-M53620WW :</i>	23
II.2.1 Caractéristique du module PV ET-M53620WW utilisé :.....	23
II.2.2 Modélisation physique (Simscape) du module PV ET-M53620WW:	24
II.2.3 Résultats de simulation des caractéristiques courant-tension et puissance-tension.....	25
<i>II.3 Influence des paramètres internes et externes sur le GPV.....</i>	27
II.3.1 Influence de l'éclairement sur le GPV :	27
II.3.2 Influence de la température sur le GPV	28
II.3.3 Influence de résistance série :.....	29
<i>II.4 Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque dans des conditions météorologiques normales :</i>	30
II.4.1 Connexion en série (chaîne PV).....	30

II.4.2	Connexion PV série_parallèle (champs PV)	32
II.5	Conclusion	34
CHAPITRE III:	Convertisseurs DC/DC.....	35
III.1	Introduction.....	36
III.2	Connexion GPV-charge	36
III.2.1	Connexion direct	36
III.2.2	Connexion indirecte via un étage d'adaptation	38
III.3	Convertisseurs DC-DC	39
III.3.1	Structure de base des convertisseurs DC-DC	39
III.3.2	Les types des convertisseurs DC-DC	39
III.3.2.1	Hacheur série (Buck)	40
III.3.2.2	Hacheur parallèle (Boost)	40
III.3.2.3	Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)	41
III.4	Le principe de fonctionnement d'un convertisseur Boost.....	42
III.4.1	Dimensionnement des composants électroniques du hacheur Boost.....	46
III.4.1.1	Calcul de l'inductance L :	46
III.4.1.2	Calcul du condensateur	48
III.5	Avantage de convertisseur BOOST :	49
III.6	Simulation du convertisseur élévateur	49
III.6.1	Calcul des composants constitutifs du hacheur Boost utilisé	50
III.6.2	Résultats de la simulation	50
III.7	Conclusion	52
CHAPITRE IV:	Etage d'adaptation contrôlé par la commande MPPT.....	53
IV.1	Introduction.....	54
IV.2	Principe de fonctionnement de la commande MPPT	54
IV.2.1	Méthodes indirectes.....	55
IV.2.2	Méthodes directes.....	56
IV.3	Algorithmes MPPT.....	56
IV.3.1	MPPT Perturbation et Observation (P&O).....	56
IV.3.1.1	Organigramme de P&O	57
IV.3.2	MPPT Incrémentation de la Conductance (INC)	58
IV.4	Simulation d'un système PV autonome	60
IV.4.1	Implémentation de l'algorithme P&O	61
IV.4.1.1	Fonctionnement dans des conditions environnementales stables	62
IV.4.1.2	Fonctionnement pour des éclairagements variables	63
IV.4.2	Implémentation de l'algorithme INC	66
IV.4.2.1	Fonctionnement dans des conditions environnementales stables	66
IV.4.2.2	Fonctionnement pour des éclairagements variables	67
IV.5	Comparaison entre les deux algorithmes.....	69
IV.6	Conclusion	71
Conclusion générale	72	

Liste des figures

Figure I.1: carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne	6
Figure I.2: carte duree moyenne d'ensoleillement en algerie.	6
Figure I.3: spectre du rayonnement solaire	7
Figure I.4: l'effet photovoltaïque.....	9
Figure I.5: representation schematique d'une cellule solaire.....	10
Figure I.6: fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	11
Figure I.7: types des cellules pv ' technologie silicium'	11
Figure I.8: modele de la cellule photovoltaïque	13
Figure I.9: caracteristique courant tension de ns cellule en serie.	16
Figure I.10: caracteristique courant tension de (np) cellule en parallele.....	16
Figure I.11: champ pv de nsmodules en serie set de np branches en paralleles.....	17
Figure I.12: types des systemes pv	17
Figure I.13: installation pv autonome.....	18
Figure I.14: systeme de pompage pv.....	19
Figure I.15: installation autonome pv avec stockage	19
Figure I.16: (a) injection partielle, (b) injection totale	20
Figure I.17: centrale pv	20
Figure I.18: systeme pv a injection au reseau	21
Figure II.1: (a) la plaque signaletique du module et-m53620ww (b) les parametres electriques dudatasheet de ce module (c) le nombre de ses cellules.....	24
Figure II.2: schema bloc de simulation du module pv et-M53620WW	25
Figure II.3: caracteristique i-v d'une cellule photovoltaïque.	26
Figure II.4: caracteristiquep-v d'une cellule photovoltaïque.	26
Figure II.5: l'influence de l'eclairment sur la caracteristique I-V	27
Figure II.6: l'influence de l'eclairment sur la caracteristique P-V	27
Figure II.7: l'influence de la temperature sur la caracteristique I-V	28
Figure II.8: l'influence de la temperature sur la caracteristique P-V	28
Figure II.9: influence de resistance rs sur la caracteristique courant-tension	29
Figure II.10: influence de resistance serie rs sur la caracteristique puissance-tension	29
Figure II.11: schema bloc de simulation des 3 modules pv et-M53620WW connecte en serie.....	30
Figure II.12: caracteristique I-V des 3 modules en serie.....	31
Figure II.13: caracteristiquep-v des 3 modules en serie.....	31
Figure II.14: connexion serie-parallele.	32
Figure II.15: caracteristique I-Vserie parallele	33
Figure II.16: caracteristiqueP-V serie parallele.	33
Figure III.1: connexion directe gpv-charge.	36
Figure III.2: points de fonctionnement d'un gpv en connexion directe, en fonction de la charge.	37
Figure III.3: etage d'adaptation entre un gpv et une charge	38
Figure III.4: chaine elementaire de conversion photovoltaïque a base d'une transformation dc controler par une commande MPPT.	38
Figure III.5: symbole d'un hacheur.	39
Figure III.6: hacheurabaisseur.	40
Figure III.7: hacheureleveur.....	41
Figure III.8: hacheur abaisseur-eleveur	41
Figure III.9: circuit electrique idealise du convertisseur DC-DC "Boost"	42
Figure III.10: forme du signal de commande du commutateur S.	43
Figure III.11: interrupteur (switch) ferme pendant un intervalle de temps dt.....	43
Figure III.12: switch ouvert pendant un intervalle de temps (1 -D)T	44
Figure III.13: variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.....	45
Figure III.14: allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une periode de conduction T.	47

Figure III.15: quantite de charge emmagasinee dans le condensateur cout durant une periode de commutation T	48
Figure III.16: schema bloc de simulation du convertisseur Boost.....	49
Figure III.17: tension de sortie 12v du convertisseur Boost.	51
Figure III.18: tension de sortie 15v du convertisseur Boost.	51
Figure III.19: tension de sortie 20v du convertisseur Boost.	52
Figure IV.1: variation du point de puissance maximal avec l'eclairment et la temperature	55
Figure IV.2: caracteristique de fonctionnement de la methode p&o.....	57
Figure IV.3: organigramme de l'algorithme p&o.	58
Figure IV.4: signe de la pente de la puissance sur la courbe p-v.	59
Figure IV.5: organigramme de la methode inc.....	60
Figure IV.6: schema bloc de la simulation d'un systeme pv.	61
Figure IV.7: schema bloc de l'algorithme p&o.....	61
Figure IV.8: simulation de la methode p&o (g=1000 w/m ²).....	62
Figure IV.9: variation de l'eclairment en fonction du temps (profil lent)	63
Figure IV.10: simulation de la methodep&o(profil lent)	64
Figure IV.11: variation de l'eclairment en fonction du temps (profil rapide)	65
Figure IV.12: simulation de la methode p&o (profil rapide)	65
Figure IV.13: schema bloc de l'algorithme inc.....	66
Figure IV.14: simulation de la methode inc pour (g=1000 w/m ²).....	67
Figure IV.15: variation de l'eclairment en fonction du temps (profil lent)	68
Figure IV.16: simulation de la methode inc (profil lent).....	68
Figure IV.17: variation de l'eclairment en fonction du temps (profil rapide)	68
Figure IV.18: simulation de la methode inc (profil rapide).....	69
Figure IV.19: courbes de comparaison entre p&o et inc.....	70

Liste des tableaux

Tableau I.1: Taux d'ensoleillement pour chaque region de l'algerie.....	6
Tableau I.2: les rendements dedifferentes filieres silicium.....	12
Tableau III.1: gain en tension des convertisseurs[21]	41
Tableau III.2: calcul des composants du hacheur boost	50
Tableau IV.1: principe de l'algorithme p&o.....	57

Liste des abréviations

C	Vitesse de la lumière $C= 3.10^* \text{ m/s}$
D	Rapport cyclique
DC/DC	Hacheur Courant Continu/Courant Continu.
E	Energie du photon
Ec	Energie de la bande de conduction
Ev	Energie de la bande de valence
Eg	Energie de gap
FF	Facteur de forme
GPV	Générateur photovoltaïque
h	Constante de Planck $h= 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
λ	Longueur d'onde en μm
Isc	Le courant de court-circuit
Iph	Photo-courant.
Is	Le Courant de saturation inverse
Impp	Courant maximale (A)
Ipv	Le courant de sortie d'un générateur PV
I-V	Courant-tension
INC	Incrémentation de la conductance
K	La constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ j/}^\circ\text{k}$).
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
N	Le facteur d'idéalité de la diode.
Nms	Nombre de modules en série
Nmp	Nombre de modules en parallèle
P&O	Perturbation et Observation
PV	Photovoltaïque
P-V	Puissance-tension
PF	Point de Fonctionnement
PWM	Pulse Wilde Modulation (MLI Modulation à Largeur d'Impulsion)
Rp	Résistance parallèle
Rs	Résistance série

STC	Standard Test Conditions (Conditions de Test Standard)
SPV	Système photovoltaïque.
T	La température d'une cellule.
Voc	La tension en circuit ouvert.
Vin	Tension d'entrée
Vout	Tension de sortie
Vpv	La tension de sortie d'un générateur PV
V_{MPP}	Tension maximale (V)
η	Rendement

Introduction Générale

Actuellement, la plus grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole ou encore l'énergie nucléaire, qui représente 81% de la production énergétique dans le monde. Durant ces dernières décennies, la consommation énergétique est en croissance dans toutes les régions du monde. En effet, d'après l'agence internationale de l'énergie, la demande mondiale d'énergie pourrait augmenter de 45 % d'ici l'an 2030. En raison du développement démographique et de l'industrialisation de pays comme la Chine et l'Inde dont le nombre d'habitants dépasse les 2 milliards, ce qui augmente la consommation d'électricité par habitant, et par conséquent ces ressources deviennent de plus en plus rares et entraînera dans les quelques prochaines décennies un risque d'épuisement de ces ressources[1].

D'autre part, ce type de ressources d'énergie entraîne des conséquences néfastes sur l'environnement. Par exemple, pour les hydrocarbures et le charbon, l'émission de gaz à effet de serre générée quotidiennement est très importante provoquant l'augmentation de la pollution et des perturbations climatiques. Toujours d'après l'agence internationale de l'énergie, les émissions mondiales de CO₂ dues à la combustion d'énergie s'établissent à 29 milliards de tonnes de CO₂ en 2009, dont 41 % par la Chine et les Etats-Unis seules, alors que les émissions mondiales de CO₂ dues à la production d'électricité s'élèvent à 11,8 milliards de tonnes de CO₂. Pour pallier à ces problèmes, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important. Une première solution consiste à diminuer la consommation énergétique, d'où l'apparition sur le marché des appareils de faible consommation de classe A ou A+ (réfrigérateurs, lave-linge, ampoules basse consommation,...). En parallèle à ces solutions, le développement de nouvelles sources d'énergies propres et renouvelables est nécessaire. Le soleil, le vent, la biomasse et la mer sont des ressources naturelles inépuisables et facilement exploitables pour générer de l'énergie électrique, disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité. Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux[2].

Introduction générale

Parmi les énergies renouvelables qui présente un taux de croissance plus élevé jour après l'autre est l'énergie solaire, son développement au niveau résidentiel et industriel est considérable. En effet, l'énergie photovoltaïque présente les avantages suivants :

- La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre,
- La lumière du soleil est disponible partout et inépuisable,
- L'électricité photovoltaïque peut être produite d'une manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

Pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement, de la température ou de la charge induit à une dégradation de la puissance fournie par le GPV, en plus ce dernier ne fonctionne plus dans les conditions optimums. Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie : c'est le principe nommé maximum power point tracker (MPPT) qui est l'objet principal de ce mémoire.

L'objectif de ce travail, est la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un SPV adapté par une commande numérique (commande MPPT : perturbation et observation (P&O) et Incrémentation de conductance (INC)), assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le GPV. L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC contrôlé par la commande MPPT (P&O et INC) lorsqu'il est couplé à un GPV et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut l'utiliser comme un générateur d'électricité.

- Ainsi, ce travail est partagé en quatre chapitres, il est présenté comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement et un aperçu sur l'énergie solaire en Algérie, ensuite nous rappellerons le principe de la conversion photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule solaire, la modélisation électrique d'une cellule PV ainsi que ses paramètres et la constitution d'un GPV. On terminera ce chapitre par présenter les différents types d'installations des systèmes PV.

Le deuxième chapitre est consacré à la simulation du GPV après avoir fait la modélisation sous l'environnement MATLAB-Simulink du GPV, nous présentons les

Introduction générale

simulations des caractéristiques courant-tension(I-V) et puissance-tension(P-V) du GPV (i.e., module PV, chaîne PV, champs PV) en fonction de la variation des paramètres météorologiques (i.e., température et ensoleillement).

Dans le troisième chapitre, les problèmes de connexion GPV-charge et la nécessité d'un étage d'adaptation sont évoqués. En effet, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge. Pour cela, les différentes topologies des convertisseurs DC-DC seront présentées. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée particulièrement à la modélisation d'un convertisseur survolteur Boost après avoir dimensionné ses composants électroniques.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des différents types d'algorithmes de recherche du point de puissance maximale, on parle donc des algorithmes « Perturbation et Observation » (P&O) et « Incrémentation de Conductance » (INC). Ensuite, la deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la simulation d'un SPV contrôlé par la commande MPPT, ce système est testé sous des niveaux d'ensoleillements stables et d'autres variables afin de voir son comportement ; surtout quand la variation d'ensoleillement est brusque. On terminera ce chapitre par une étude comparative entre la commande P&O et INC afin de choisir le meilleur suiveur du point de puissance maximale.

CHAPITRE I:
GENERALITES
SUR LES CHAINES
DE
CONVERSION
PHOTOVOLTAÏQUE

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque autrement dite EPV est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des capteurs photovoltaïques. C'est une forme d'énergie renouvelable, car le Soleil est considéré comme une source inépuisable et disponible en abondance sur toute la surface de la terre, donc elle est l'alternatif le plus approprié pour une source durable et peu polluante. Actuellement, la technologie photovoltaïque devient de plus en plus avancée, les éléments de base sont des cellules ou des panneaux photovoltaïques qui convertissent le rayonnement solaire en courant électrique, on parle alors de l'effet photovoltaïque. Malgré le progrès technologique, l'inconvénient de cette énergie réside dans le faible rendement et le coût élevé par rapport aux autres formes[3]

Dans ce chapitre, nous étudierons le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ainsi que les différentes technologies utilisées pour la réalisation d'un GPV.

I.2 Le gisement solaire

Avant de faire l'installation PV et Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. Le gisement solaire est l'ensemble des données décrivant l'évolution du rayonnement solaire, c'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une unité de surface.

I.2.1 Énergie solaire en l'Algérie

Vue sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh[4].

Selon l'ensoleillement reçu annuellement, les Figures I.1 et I.2 montrent respectivement la carte de l'irradiation globale solaire et la carte durée moyenne d'ensoleillement en Algérie. Le Tableau I.1 indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie[3]

Tableau I.1 Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie

Régions	Régions côtière	Haut plateaux	Sahara
Superficie (%)	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

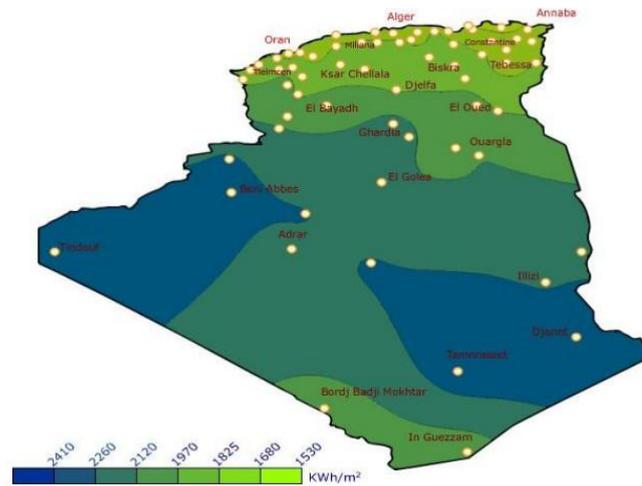


Figure I.1 : Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne

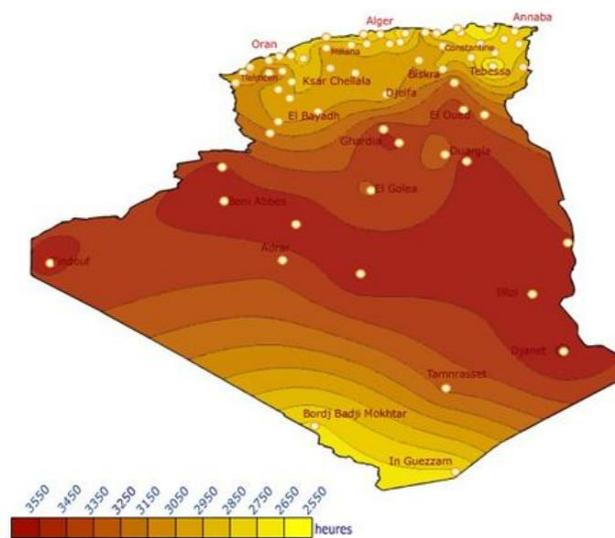


Figure I.2 : Carte Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.

I.2.2 Le rayonnement solaire

La lumière solaire est la source d'énergie principale dont nous disposons, elle est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde, des photons d'énergie donnée par :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad I.1$$

Avec :

λ : Longueur d'onde,

h : Constante de Planck

c : Célérité de la lumière.

D'après cette relation, l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le visible et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère[5]

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,25\mu\text{m}$ (ultra-violet) et $4\mu\text{m}$ (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour $0,5\mu\text{m}$. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons[6].

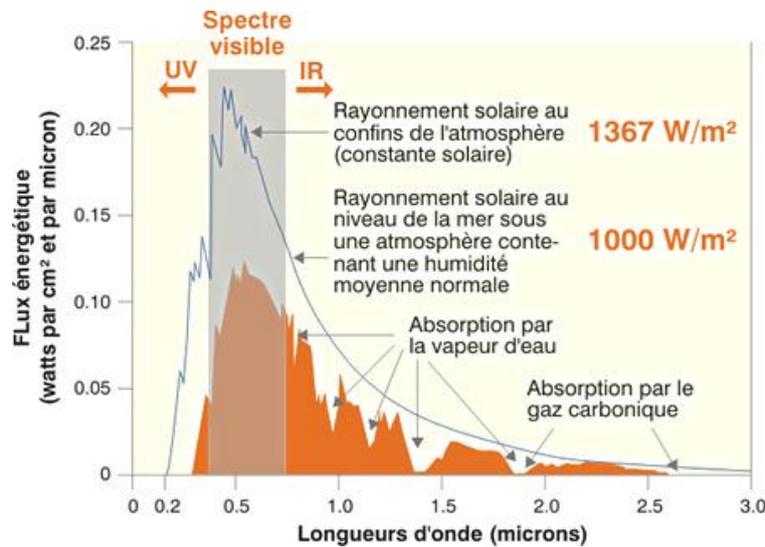


Figure I.3: Spectre du rayonnement solaire

I.3 Le photovoltaïque

I.3.1 Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base d'un SPV [7].

Quelques dates importantes dans l'histoire de la photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- Lem et Heweliusz, les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITe, décolleront en 2013.

I.3.2 L'effet photovoltaïque

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique par le biais d'un capteur constitué d'un matériau **semi conducteur** sensible à l'énergie

contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule PV[8].

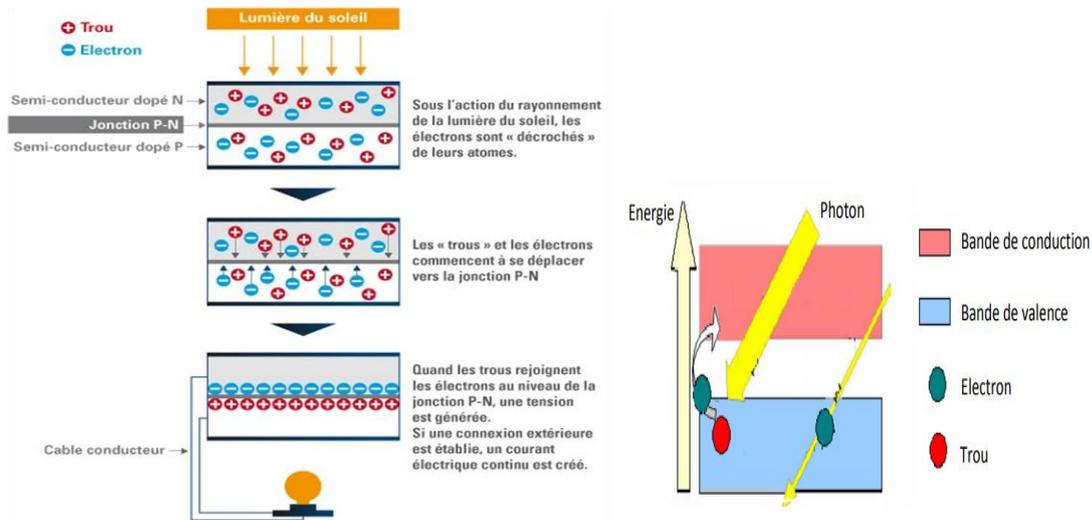


Figure I.4 :l'effet Photovoltaïque.

La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule (Fig.I.4) Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap E_g de ce semi-conducteur ($E_g = E_c - E_v$), avec E_c l'énergie de la bande de conduction et E_v l'énergie de la bande de valence), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électrons-trou[6, 9]. Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie très inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque[6].

I.4 Cellule photovoltaïque

Une cellule PV qu'on appelle aussi la photopile est un composant électronique réalisé à l'aide de composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand ils sont éclairés. Elle est généralement conçue du silicium sous ses différentes formes[10].

I.4.1 . Structure d'une cellule.

La structure de base d'une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de **silicium**, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face de la zone P du cristal et joue le rôle d'anode [11]

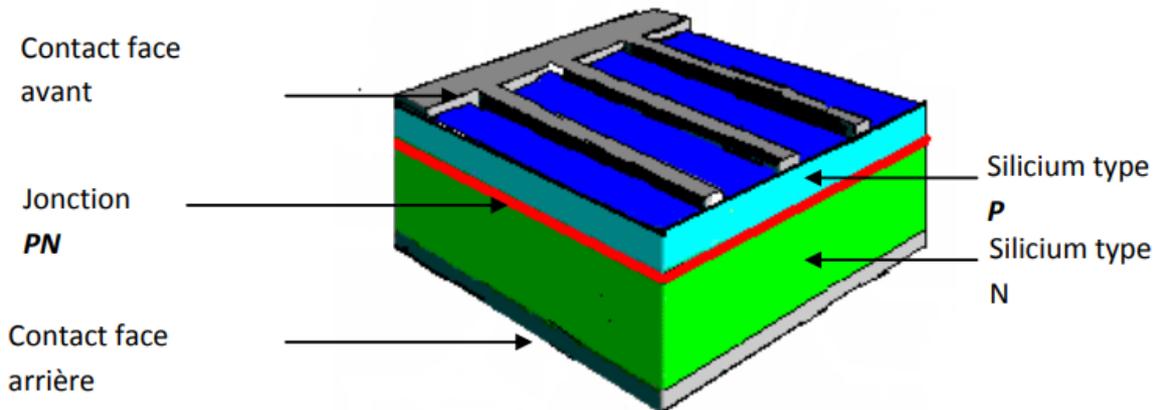


Figure I.5: Représentation schématique d'une cellule solaire.

I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN. Ainsi, les atomes se trouvent bombardés par les photons constituant la lumière (Fig.I.6), et sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches de valence ont tendance à être arrachés/décrochés de leur orbites. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule, à travers une charge[3].

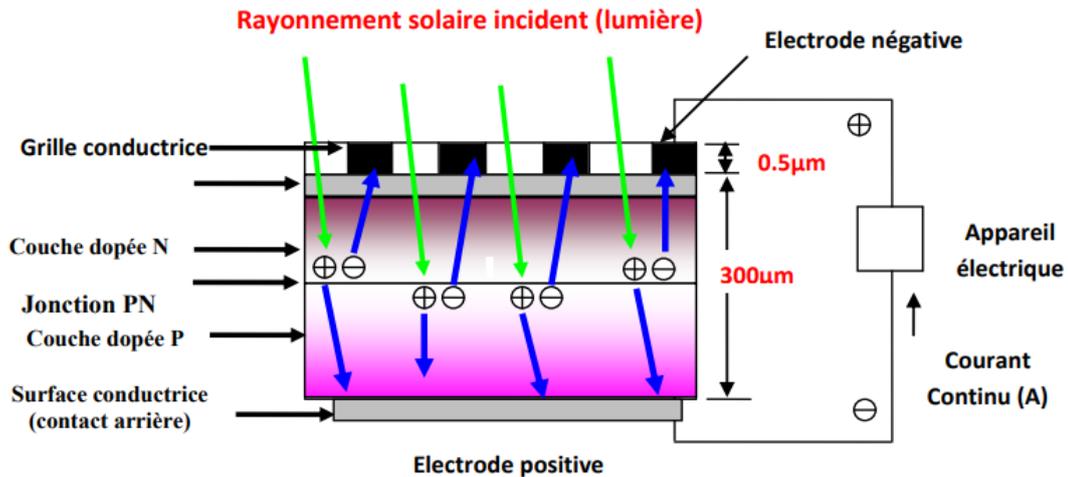


Figure I.6: fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

I.4.3 Différents types de cellules

I.4.3.1 Les cellules solaires à base de Silicium

Différents types de technologies de fabrication des cellules photovoltaïques existent sur le marché, en effet les cellules photovoltaïques basés sur le silicium cristallin dominent le marché avec plus de 90%. On distingue deux catégories des cellules fabriquées à partir du silicium cristallisé, celles à partir de silicium monocristallin et celles à partir de silicium polycristallin. Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium poly-cristallin mais de rendement est plus élevé. Le silicium est aussi utilisé dans la technologie dite amorphe, lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui sera projeté sur une feuille de verre. Ce type de cellules présente l'avantage d'être intégré sur des supports souples ou rigides, il est utilisé généralement pour les calculatrices et les montres[12].

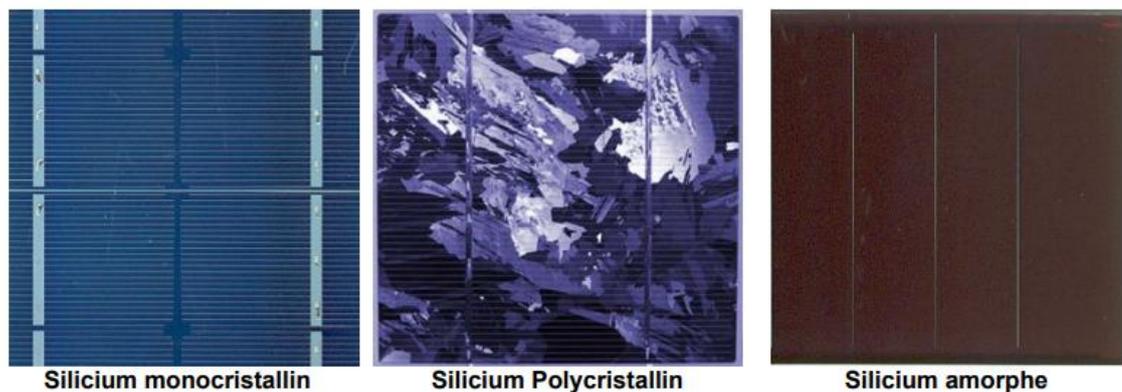


Figure I.7: types des cellules PV ' Technologie silicium '

Le tableau 1.2 montre les rendements des différentes filières silicium présentement sur le marché [6]

Tableau I.2 : les rendements de différentes filières silicium

Type de cellule	Rendement en Laboratoire	Rendement de Production
Silicium amorphe (a-si)	13%	5 – 6%
Silicium monocristallin (m-si)	24.7%	13 – 17%
Silicium poly cristallin (p- si)	19.8%	11 – 15%

I.4.3.2 Autre technologies ;

On cite aussi quelques types de cellules photovoltaïques qu'on peut rencontrer[13], telles que :

- La cellule photovoltaïque multi-jonction : Ces cellules sont constituées de plusieurs couches minces associant de matériaux semi-conducteurs. Par exemple, Une cellule triple jonction est constituée des semi-conducteurs GaAs (arséniure de gallium), Ge (germanium) et GaInP2 (Phosphure d'indium gallium). Le rendement des cellules multi-jonction est très élevé, il dépasse parfois les 40%. Ces cellules ont été développées en priorité pour les applications spatiales à cause de son coût de fabrication très élevé.
- La cellule photovoltaïque CIGS : La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support. Ces nouvelles techniques de haute performance utilisent des métaux rares comme l'indium dont la production mondiale est faible, ce qui rend le coût de fabrication élevé.

I.5 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons le modèle à une seule diode (Fig. I.8)[14].

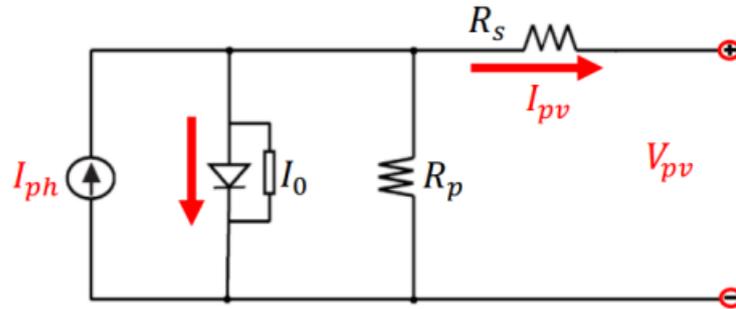


Figure I.8: modèle de la cellule photovoltaïque .

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode, le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et de front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt R_p . Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule PV est donné par [15]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{KT} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_s} \quad 1.2$$

- I_{pv} et V_{pv} représentent le courant et la tension de sortie d'une cellule solaire, respectivement
- I_{ph} et I_s représentent le photo-courant et le courant de saturation d'une diode, respectivement.
- R_p La résistance parallèle, ou la résistance shunt d'une cellule solaire. Elle traduit la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible. Pratiquement, la valeur de la résistance (R_p) est élevée donc on peut la négliger.
- R_s représente la résistance série, elle est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule solaire

- q : Charge de l'électron = $1,60217646 \times 10^{-19}$ C.
- k : Constante de Boltzmann = $1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K.
- T : Température en kelvin.

I.5.1 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire, ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques.

I.5.1.1 Le 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_s nulle et R_p infinie, ce courant se confond avec le photon courant I_{ph} en annulant la tension V dans l'équation.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad I.3$$

I.5.1.2 La tension en circuit ouvert V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. L'expression de V_{CO} est donnée par[16]

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad I.4$$

I.5.1.3 Facteur de Forme FF

On appelle facteur de forme FF, facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt}$ et le produit du courant de court circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_p il est défini par[16] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad I.5$$

I.5.1.4 Le rendement η

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximal délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{\text{puissance délivrée par la cellule}}{\text{puissance captée par la cellule}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{G \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{G \cdot S} \quad \text{I.6}$$

G : L'irradiation solaire en W/m²

S : Surface de la cellule solaire (m²)

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{co} .

I.5.1.5 Le point de puissance maximale (PPM)

C'est la puissance maximale qui doit générer un module photovoltaïque afin d'avoir un fonctionnement optimale. Cette puissance est définie par :

$$\text{PPM} = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} \quad \text{I.7}$$

I.6 Le générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmente.

I.6.1 Regroupement des cellules en série

Une association de (N_s) cellule en série figure (I.9) permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{co \ ns} = N_s \cdot V_{co} \quad \text{I.8}$$

$$I_{sc} = I_{cc} \quad \text{I.9}$$

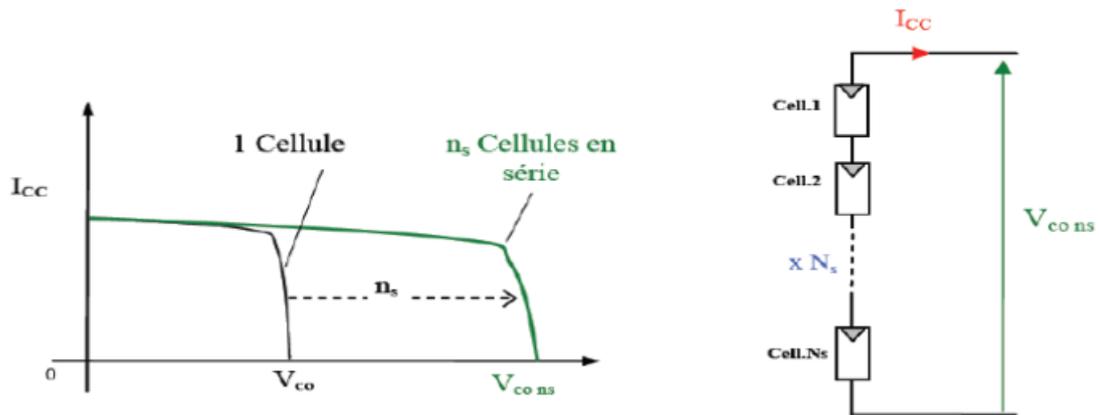


Figure I.9 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.

I.6.2 Regroupement des cellules en parallèle :

Une association parallèle de (Np) cellule figure (I.10) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, Avec:

$$I_{cc\ np} = N \cdot I_{cc} \tag{I.10}$$

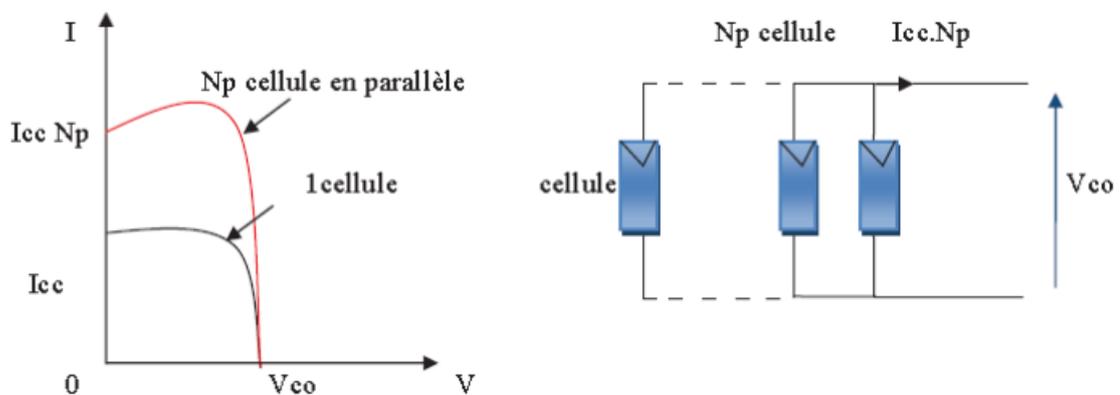


Figure I.10: Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.

I.6.3 Regroupement des cellules en série/parallèle

C'est un regroupement mixte des cellules (série et parallèle) afin d'augmenter la tension et l'intensité de l'utilisation pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et ou en parallèle des modules, par le biais des liaisons situées dans la boîte

de connexion équipée de moyens de sécurité nécessaires, formant ainsi un champ PV. Comme illustré dans la Fig.(I.11), un champs PV est par définition constitué de modules de même technologie et de caractéristiques identiques, associés électriquement entre eux soit en série ou en parallèle [12]. Alors le courant et la tension d'un champ PV constitué de N_s modules en série, et N_p modules en parallèle sont :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_m \tag{I.11}$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V_m \tag{I.12}$$

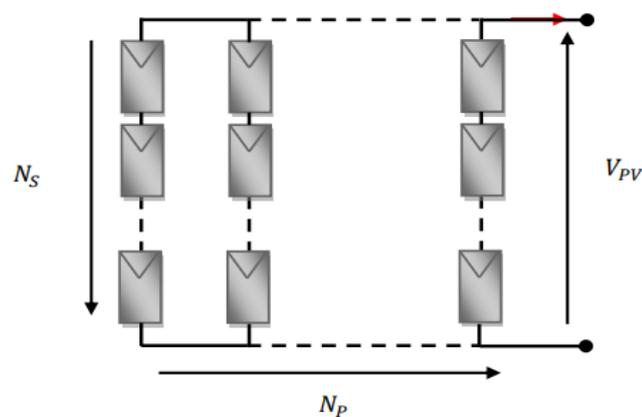


Figure I.11: Champ PV de N_s modules en série set de N_p branches en parallèles

I.7 Les différents types des systèmes PV

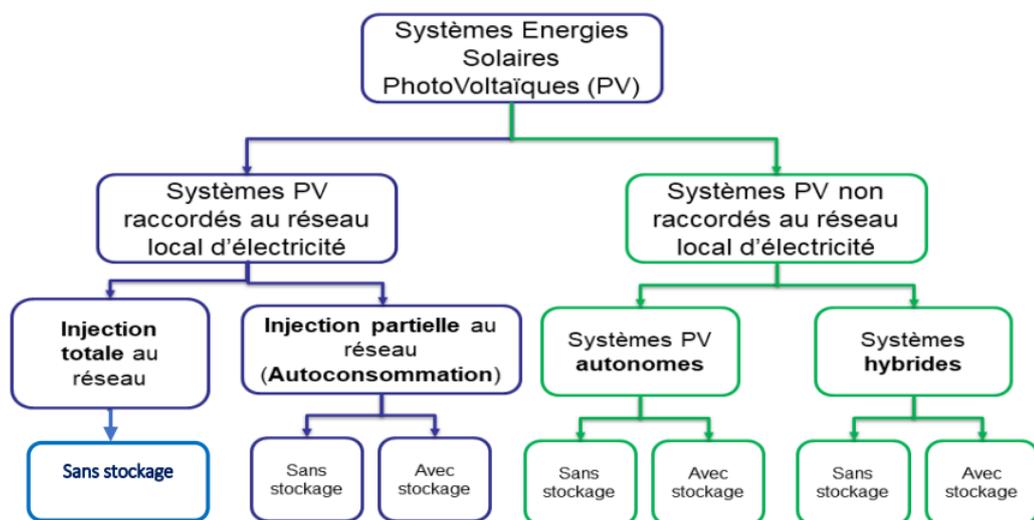


Figure I.12 :types des systèmes PV[17]

I.7.1 Les systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Fig.I.13). Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes du non disponibilité de l'énergie solaire ou les périodes non ensoleillées. Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle[18].

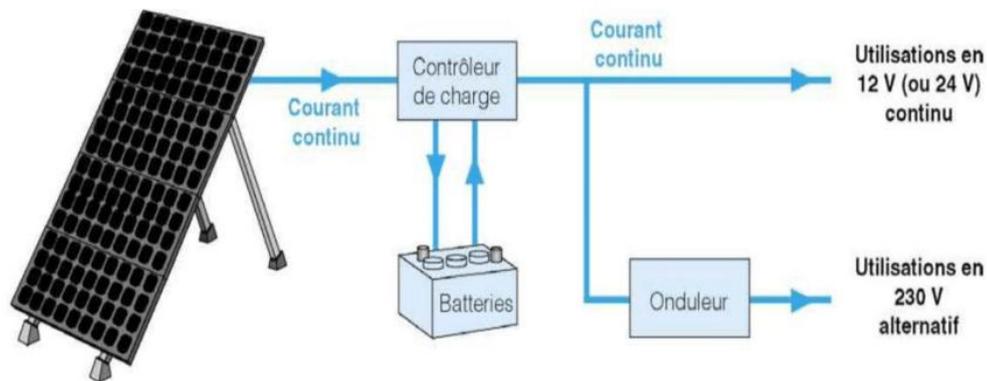


Figure I.13 :Installation PV autonome.

I.7.1.1 Systèmes autonomes au fil du soleil

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage. Ils exploitent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint. Ces systèmes sont classés, selon la nature de la charge à alimenter, en deux types systèmes à courant continu et systèmes à courant alternatif. L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque (fig I.14) avec ses deux types : systèmes de pompage PV à courant continu et systèmes à courant alternatif. Pour le deuxième cas on doit ajouter un onduleur[18]

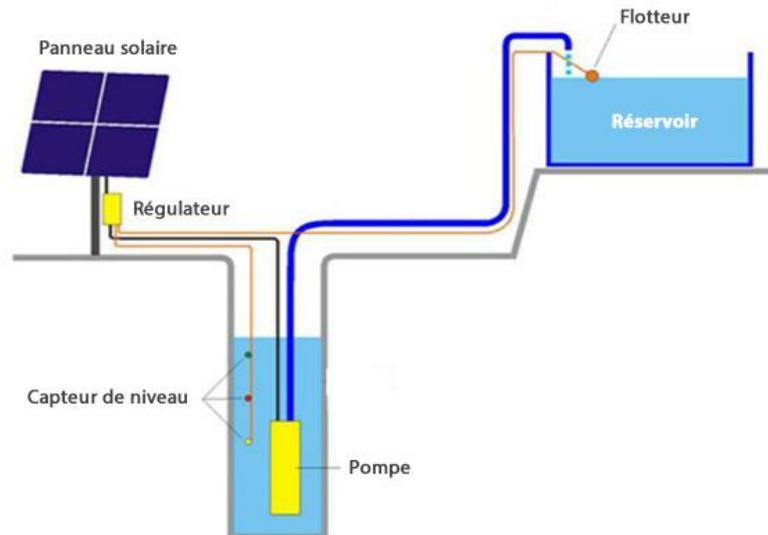


Figure I.14: système de pompage PV

I.7.1.2 Les systèmes avec stockage

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits). Le système de stockage sert à emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie. Comme exemple, on peut citer l'alimentation des maisons en électricité dans des sites isolés.

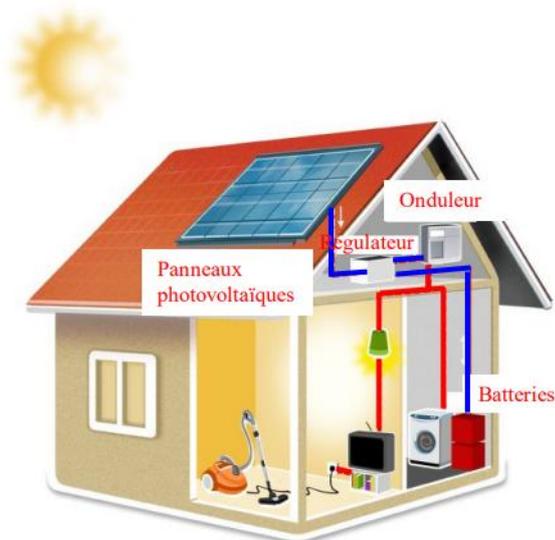


Figure I.15: installation autonome PV avec stockage

I.7.2 Systèmes PV à injection aux réseaux

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique. i.e. le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique fig I.16, on distingue deux classes de systèmes raccordés aux réseaux :

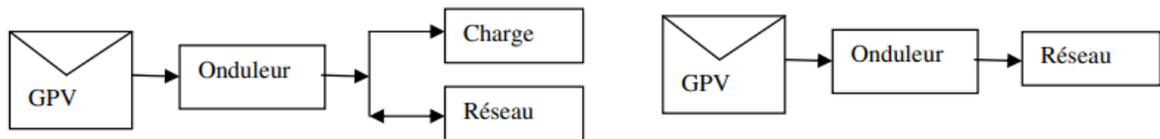


Figure I.16 : (A) injection partielle, (B) injection totale

I.7.2.1 Systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque)

Ce sont les systèmes à grandes puissances localisés dans des endroits où l'alimentation est centralisée. Ils sont utilisés pour renforcer le réseau conventionnel durant les périodes de pic de puissances. Ces systèmes nécessitent des espaces très vastes (environ 2 hectares pour un 1MWc)



Figure I.17: centrale PV

I.7.2.2 Systèmes à petite puissance ou systèmes décentralisés

En quantité unitaire, les systèmes décentralisés de petite puissance (inférieur à 100 kWc) sont les plus courants, avec approximativement 80 % des systèmes raccordés au réseau mondial, la majorité étant posé sur des habitations individuelles

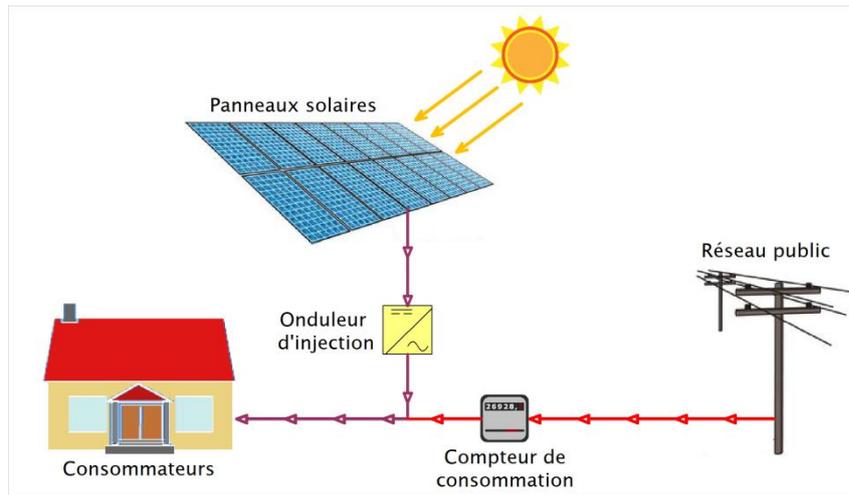


Figure I.18: système PV à injection au réseau

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description sur l'énergie solaire en Algérie et afin de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, nous avons décrit tous les éléments qui constituent la production PV tel que la cellule photovoltaïque, le panneau, le générateur PV ainsi que les types des systèmes PV qu'on peut rencontrer.

Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ainsi que les différentes technologies utilisées pour la réalisation d'un GPV. Des aspects technologiques qu'électriques ont été abordé afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de la conversion PV.

Pour la modélisation électrique de la cellule, on s'est basé sur le modèle électrique à une seule diode qui va nous servir à la simulation du GPV dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II:

*MODELISATION ET
SIMULATION D'UN
GENERATEUR
PHOTOVOLTAÏQUE*

II.1 Introduction

Pour développer un circuit équivalent précis pour un module PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments constituant ce module aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément.

Dans ce chapitre, nous présenterons les propriétés électriques de la plaque signalétique d'un module PV nécessaire pour construire le modèle physique pour ce dernier. Ensuite, nous simulons les caractéristiques électriques I-V et P-V et voir l'influence des variations de la température ou de l'ensoleillement sur la conversion PV pour un module ainsi que pour une chaîne photovoltaïque sous l'environnement Matlab-Simulink en utilisant des blocs de bibliothèques Simscape.

II.2 Modélisation et simulation du module PV ET-M53620WW :

Le module choisi a été modélisé et simulé dans l'environnement Simscape/MATLAB , il présente les caractéristiques suivantes :

II.2.1 Caractéristique du module PV ET-M53620WW utilisé :

Nous avons choisi le module **ET-M53620WW** composé de 36 cellules en silicium monocristallin connectées en série ayant une puissance maximale de 20w est considéré dans les conditions standards $G=1000\text{w/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation. La figure II.1(a) et (b) montrent les caractéristiques fournies par le constructeur de ce module (la plaque signalétique). Le nombre des cellules dans un module PV peut être déterminé par la datasheet ou par le comptage direct sur le module, comme il est indiqué à la figure II-1 (c).

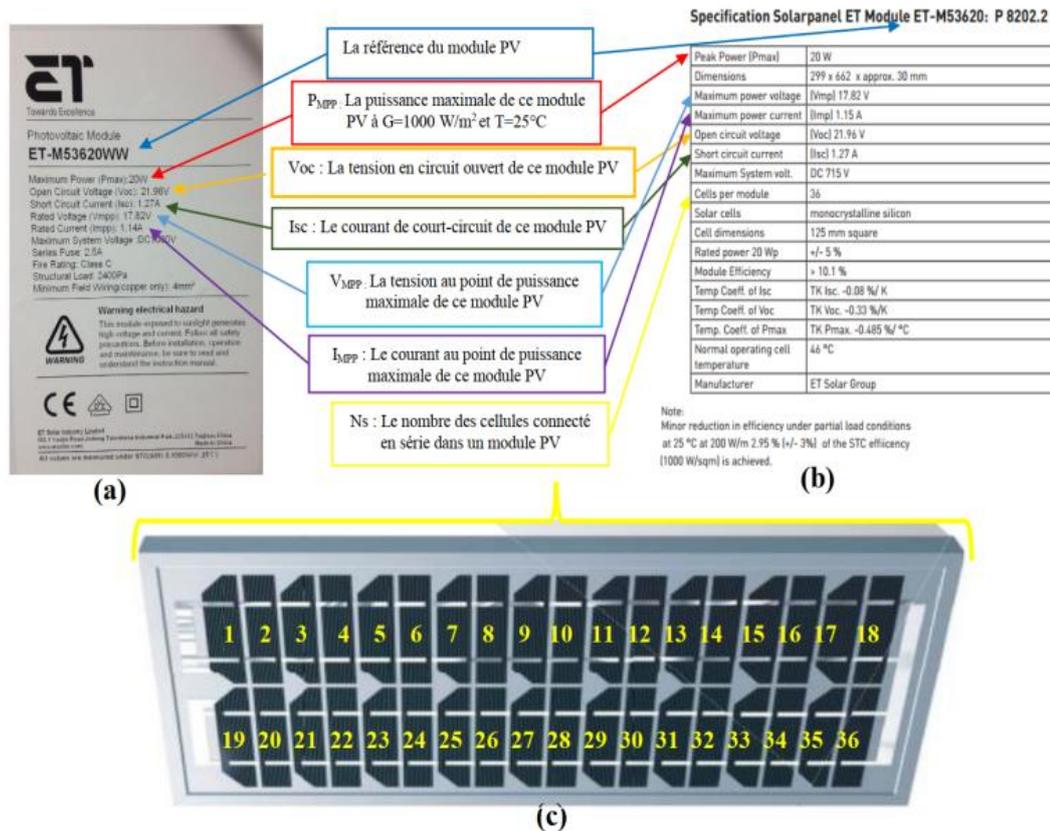


Figure II.1:(a) la plaque signalétique du module ET-M53620WW (b) les paramètres électriques de datasheet de ce module (c) le nombre de ses cellules

II.2.2 Modélisation physique (Simscape) du module PV ET-M53620WW:

La figure (II.2) représente la modélisation physique du module *ET-M53620WW* sous *Simscape/Matlab*, la modélisation de ce module est faite en trois étapes :

- Etape 1 : modélisation physique de module *ET-M53620WW* contenant 36 cellules,
- Etape 2 : résistance variable,
- Etape 3 : bloc Simulink pour mesure de tension, courant et puissance.

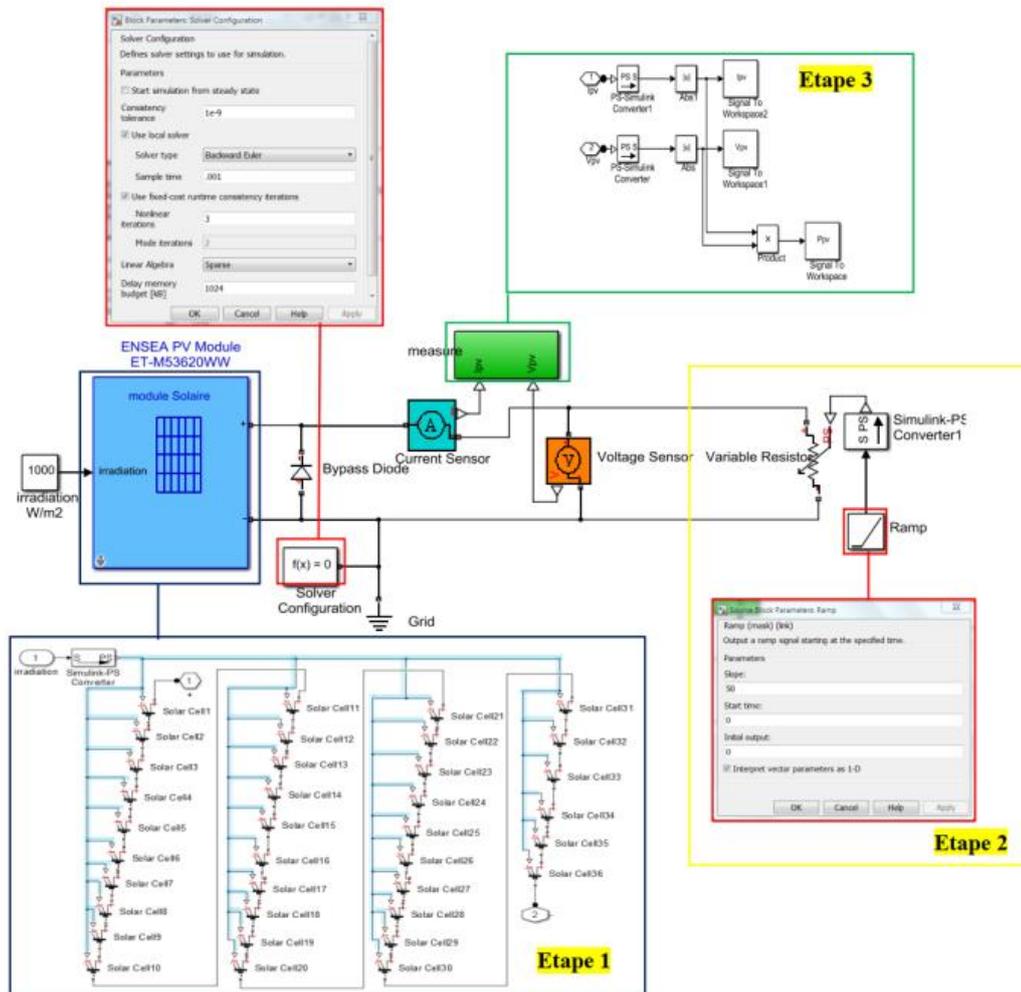


Figure II.2:schéma bloc de simulation du module PV ET-M53620WW

II.2.3 Résultats de simulation des caractéristiques courant-tension et puissance-tension

Les figures II.3 et II.4 représentent respectivement les caractéristiques I-V et P-V dans les conditions standards STC à 25⁰C et 1000w/m².

Comparant avec les caractéristiques données par le constructeur (voire figII.1), nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques réelles (expérimentales) et celles déduites par simulation.

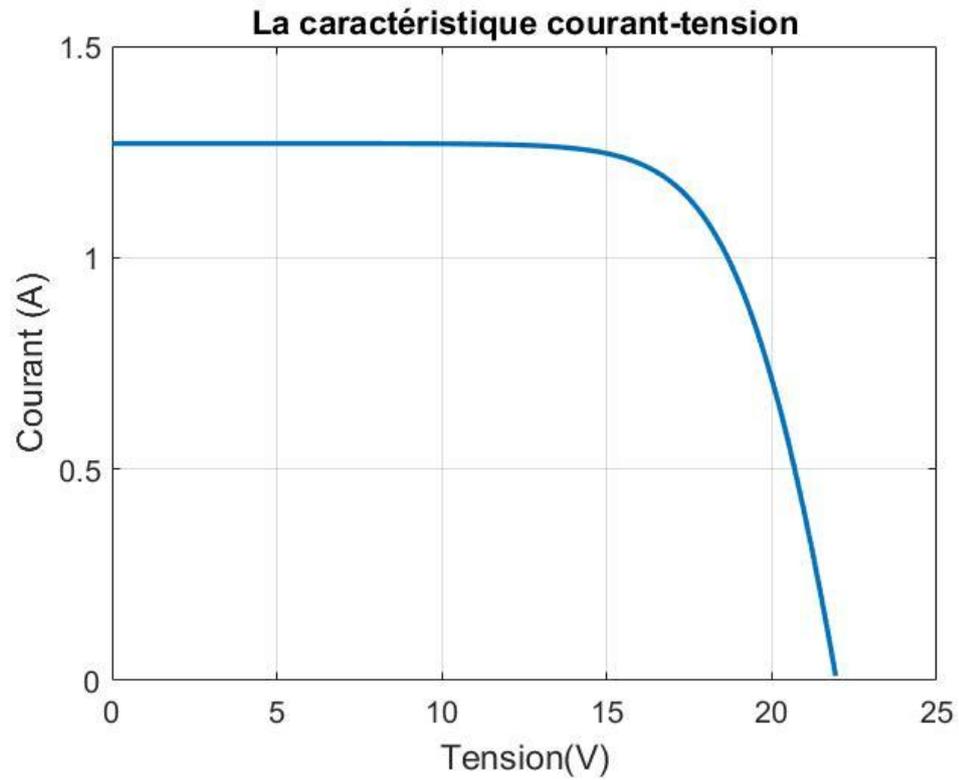


Figure II.3. Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

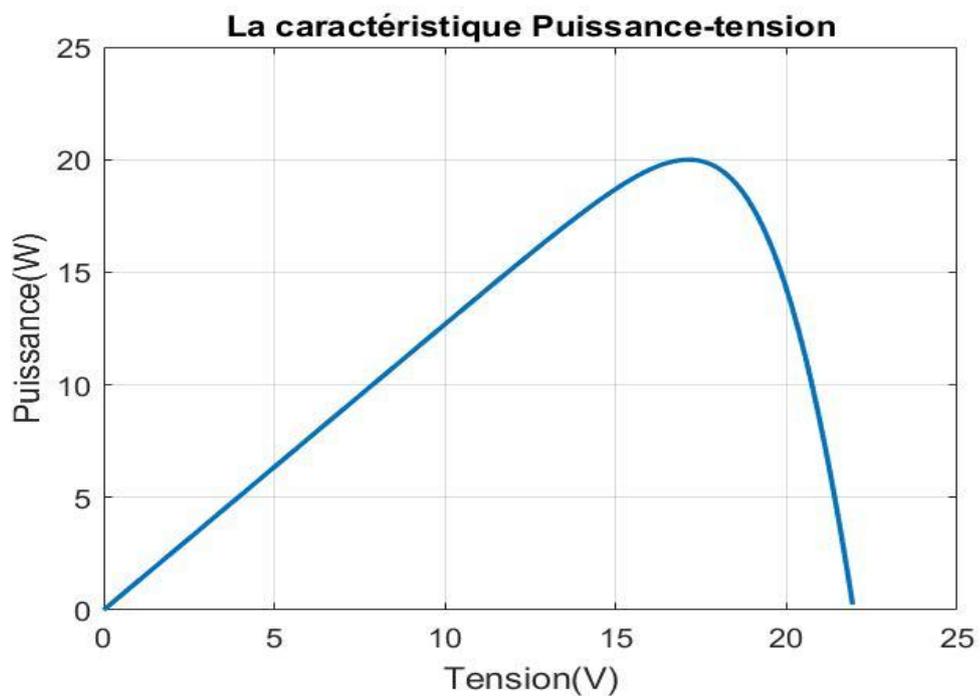


Figure II.4: Caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque.

II.3 Influence des paramètres internes et externes sur le GPV

II.3.1 Influence de l'éclairement sur le GPV :

Les figure (II.5) et(II.6) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-Vet P-V. À température constante, Pour chacun de différents éclairements correspond une puissance maximale que pourrait fournir le panneau, notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.

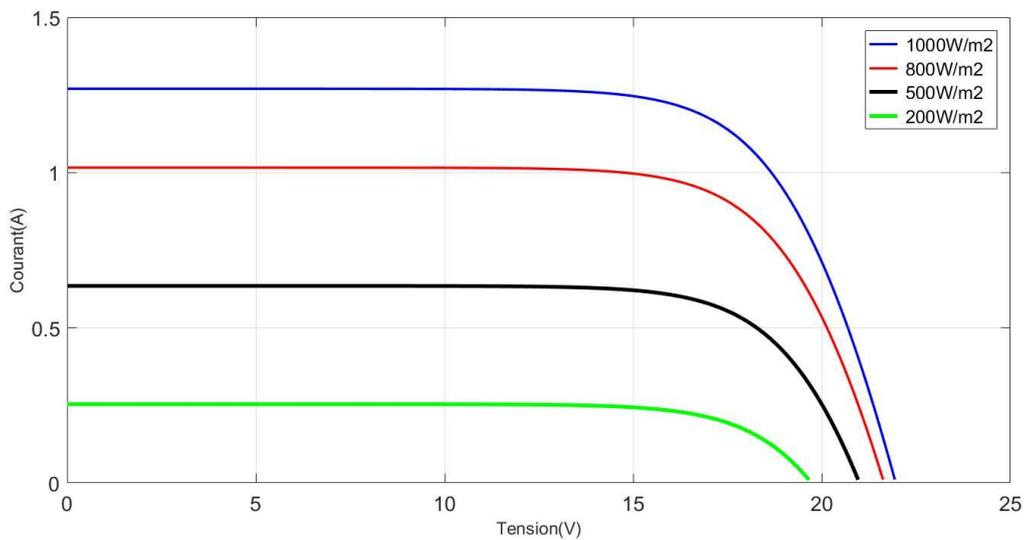


Figure II.5: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V

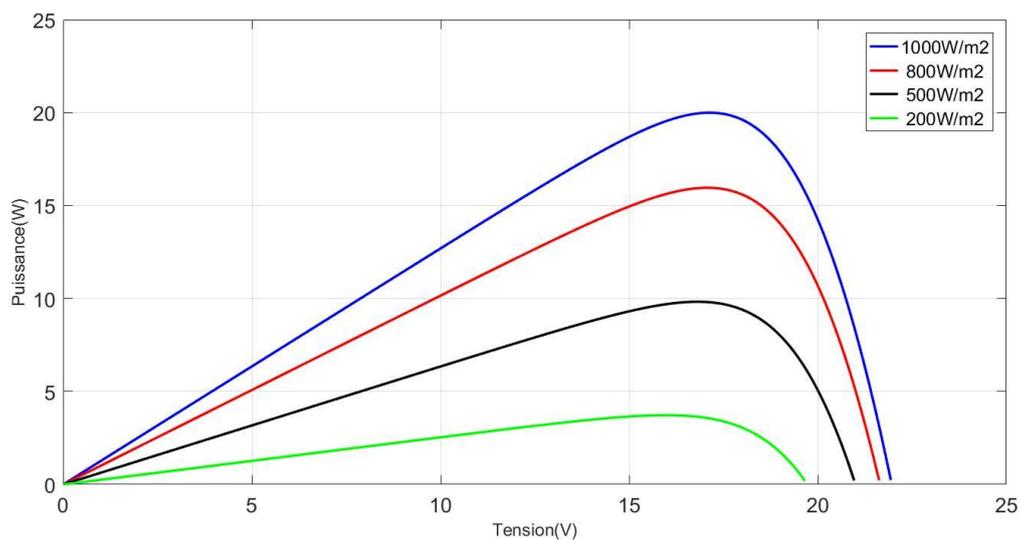


Figure II.6: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V

II.3.2 Influence de la température sur le GPV

La figure (II.7) montre l'influence de la température sur la caractéristique I-V sous un éclairage fixe de 1000W/m^2 et à des températures comprises entre 0°C et 100°C . Nous remarquons que le courant de court-circuit dépend légèrement de la température, par contre la tension de circuit ouvert diminue avec l'augmentation de température. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

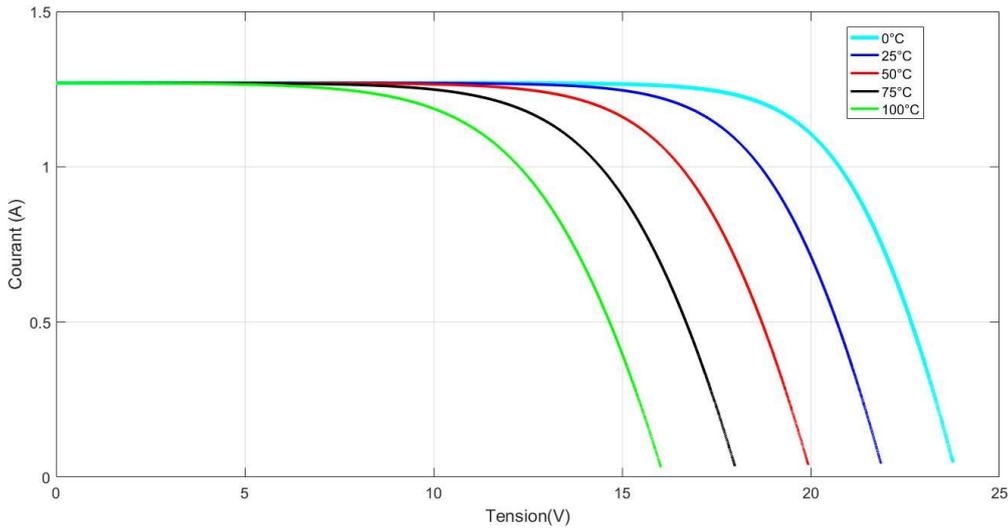


Figure II.7 :L'influence de la température sur la caractéristique I-V

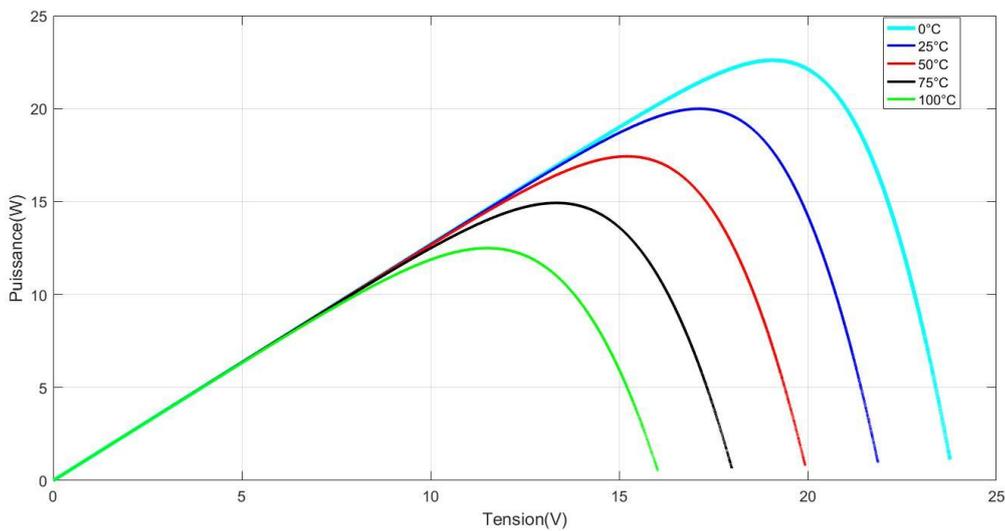


Figure II.8:L'influence de la température sur la caractéristique P-V

II.3.3 Influence de résistance série :

Les figures II.9 et II.10 montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule photovoltaïque. La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant I_{cc} . L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.

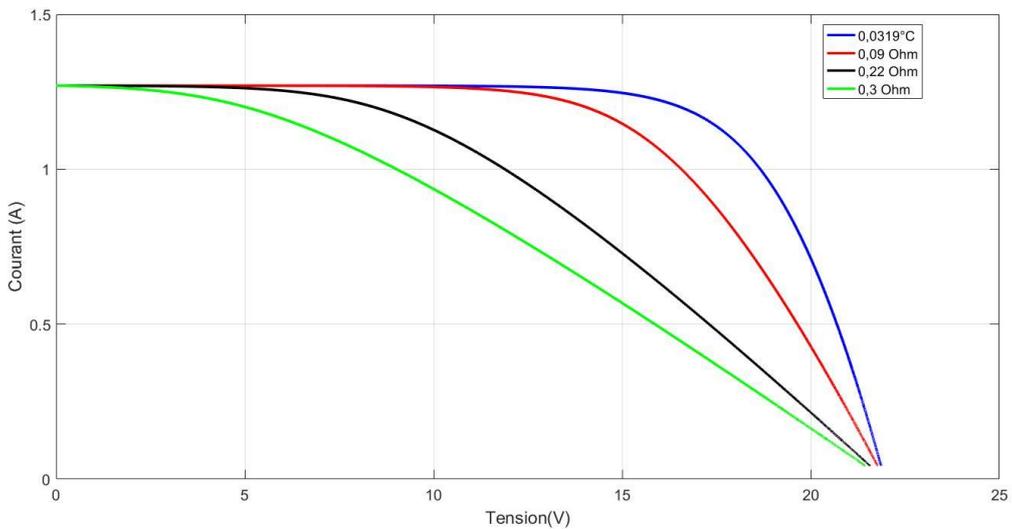


Figure II.9: Influence de résistance R_s sur la caractéristique courant-tension

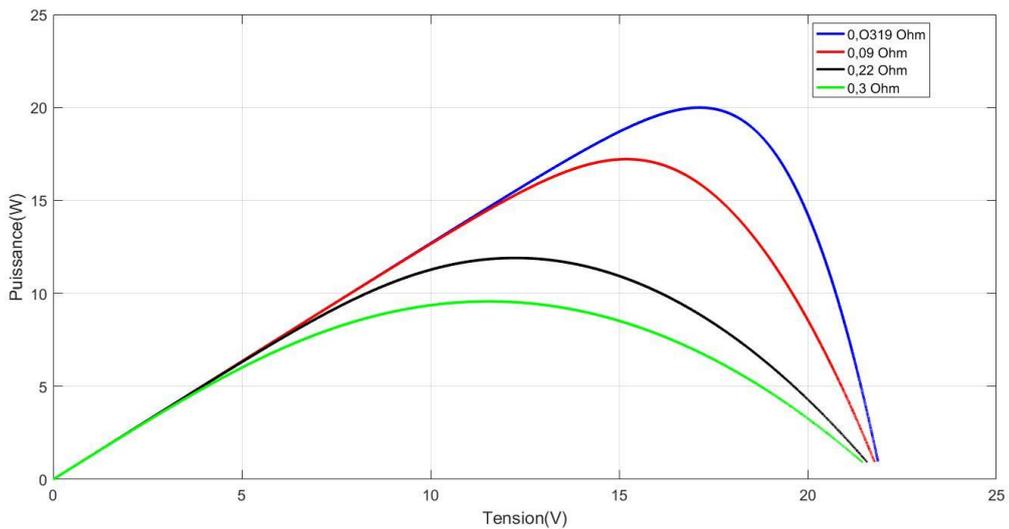


Figure II.10: Influence de résistance série R_s sur la caractéristique puissance-tension

II.4 Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque dans des conditions météorologiques normales :

La modélisation d'un GPV doit tenir en compte des différentes configurations de modules PV y compris les différentes conditions météorologiques de fonctionnement (i.e., différents niveaux d'irradiation et de température). Différentes topologies de panneaux photovoltaïques existent, elles diffèrent selon les connexions entre modules constituant les chaînes et les connexions entre chaînes constituant le champ photovoltaïque.

II.4.1 Connexion en série (chaîne PV)

Une chaîne photovoltaïque est l'association de N_{ms} des modules en série. On considère que tous les modules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, la chaîne photovoltaïque de la figure II.11 contient trois modules «ET-M53620WW» connectés en série ($N_{ms} = 3$), chaque module est connecté en parallèle avec son diode bypass, on fixe la température à 25°C et l'éclairement à 1000w/m^2 .

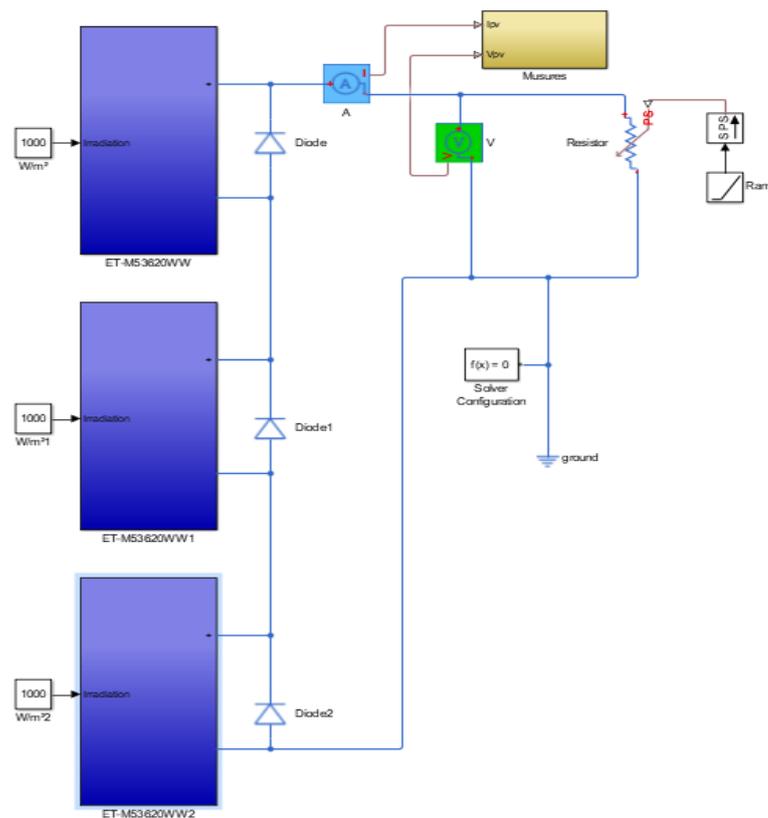


Figure II.11: schéma bloc de simulation des 3 modules PV ET-M53620WW connectés en série

Les figures II.12 et II.13 représentent respectivement les caractéristiques I-V et P-V dans les conditions standards STC, on remarque que le courant reste le même tandis que la tension s'est triplé et par conséquent la puissance augmente

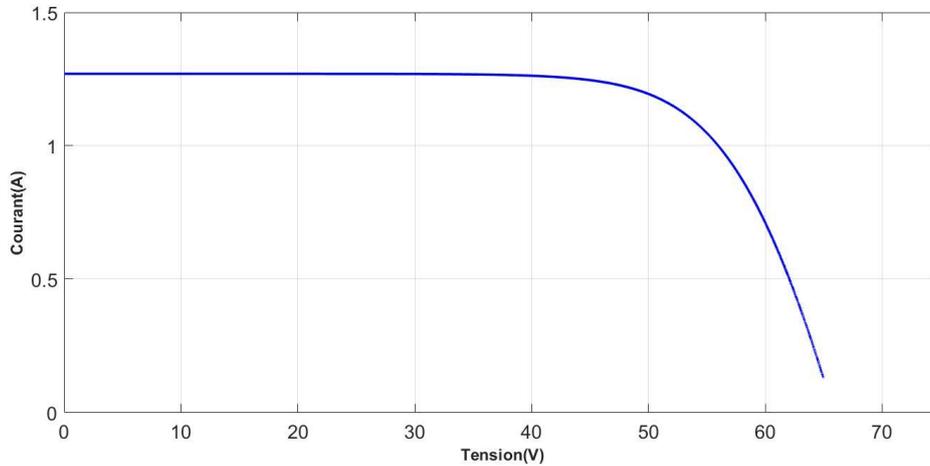


Figure II.12: caractéristique I-V des 3 modules en série

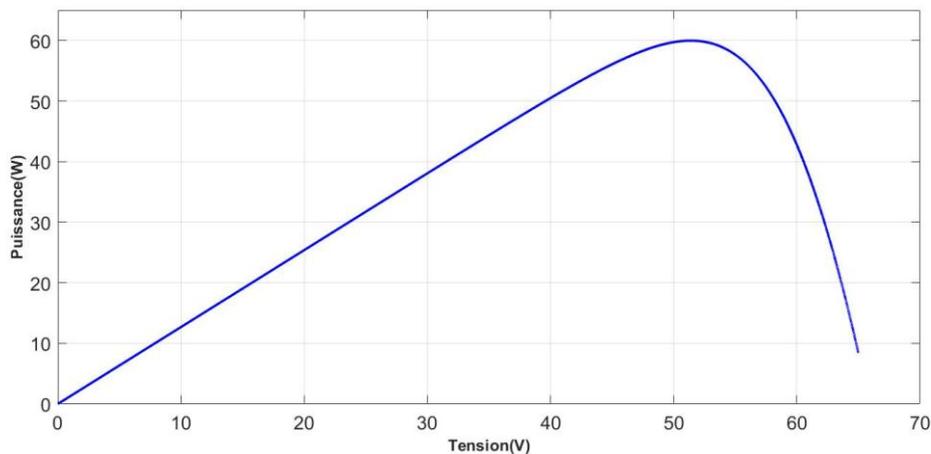


Figure II.13: caractéristique P-V des 3 modules en série.

Les relations suivantes nous permettent de confirmer les résultats obtenus, La relation (II-1) nous montre que la configuration des modules en chaine (série) permet d'augmenter la tension du GPV pour avoir la tension souhaitée.

$$V_{oc_chaîne} = 3 \times V_{oc_module} \tag{II.1}$$

$$I_{SC_chaîne} = I_{SC_module} \tag{II.2}$$

$$P_{MPP_chaîne} = (3 \times V_{MPP_module}) \times I_{MPP} \tag{II.3}$$

II.4.2 Connexion PV série_parallèle (champs PV)

Un champ photovoltaïque est constitué de plusieurs chaînes de modules photovoltaïques. La figure (II-14), représente une configuration série/parallèle avec (Nms =3 et Nmp =2). On considère que les modules «ET-M53620WW » sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions. Chaque module est connecté en parallèle avec son diode bypass , on fixe la température à 25⁰C et l'éclairement à 1000w/m².

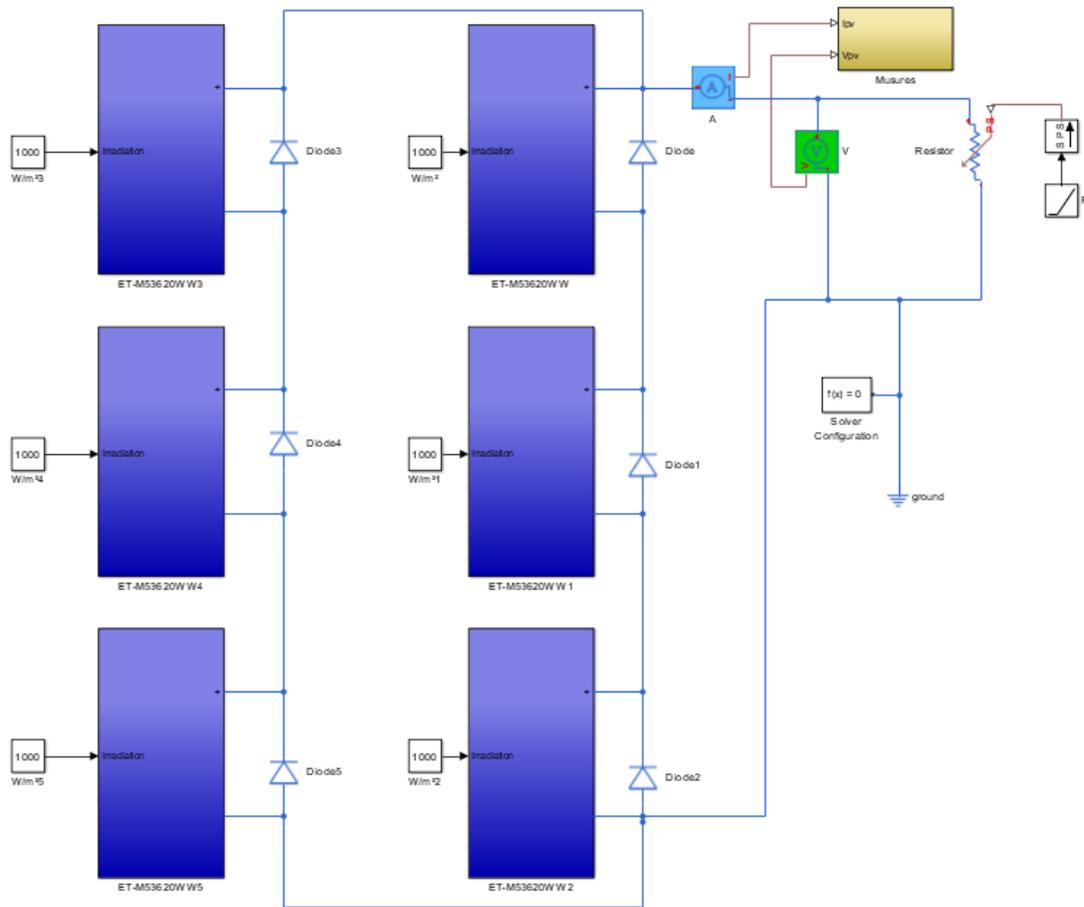


Figure II.14: connexion série-parallèle.

Les figures II.15 et II.16 représentent respectivement les caractéristiques I-V et P-V dans les conditions standards STC. Les résultats de simulation montrent que le courant de court-circuits'est doublé puisque Np=2, la tension s'est triplé puisque Nms=3 et par conséquent la puissance augmente.

$$Voc_champ = 3 \times Voc_module \tag{II.4}$$

$$Isc_champ = 2 \times Isc_module \tag{II.5}$$

$$P_{MPP_champ} = (3 \times VMPP_module) \times (2 \times I_{MPP_module})$$

II.6

La relation (II-6) nous montre que la configuration de module PV en champ (série/parallèle) permet d'augmenter la puissance du GPV pour avoir la puissance souhaitée.

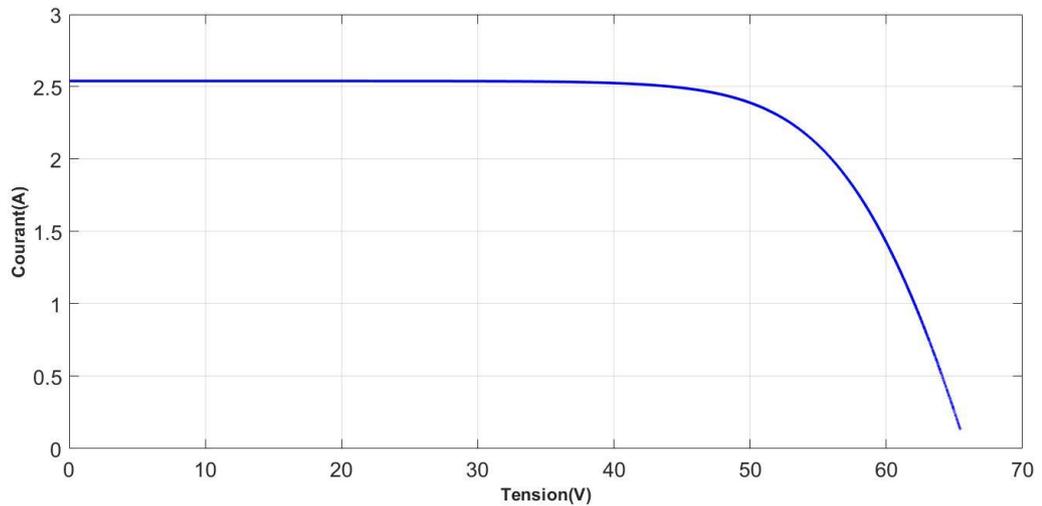


Figure II.15 : caractéristique I-V série-parallèle

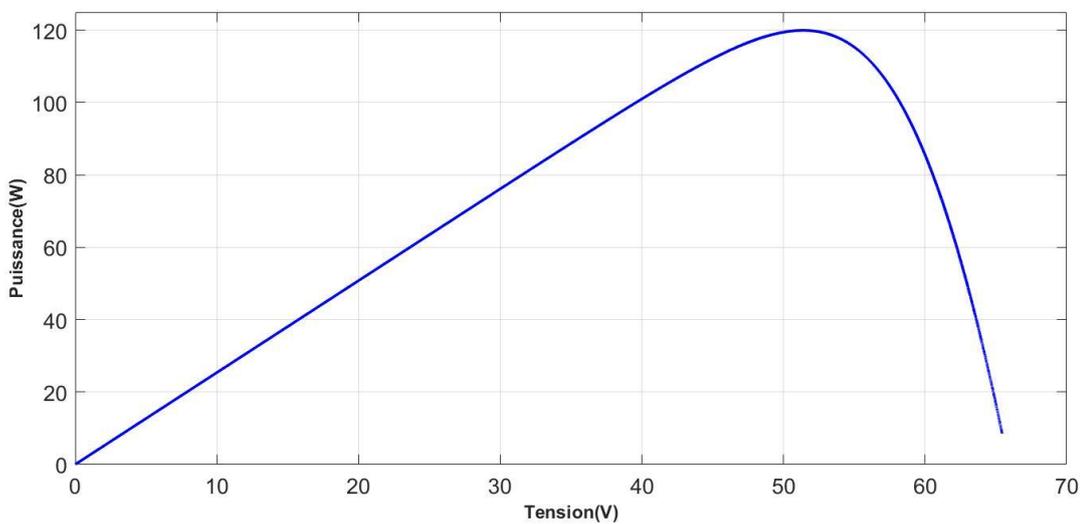


Figure II.16 : caractéristique P-V série parallèle.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons construit le modèle physique du module photovoltaïque ET-M53620WW, en utilisant des blocs de bibliothèques Simscape, on a pu simuler les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque et analyser l'influence des différents paramètres extérieurs tels que la température et l'irradiation sur la conversion photovoltaïque.

Nous avons remarqué que les performances d'un GPV sont fortement influencées par les conditions météorologiques (température, éclairage) et on a constaté que le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairage et la tension à vide avec la température. Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que lorsque R_s est grande.

Dans un second lieu, nous avons abordé la modélisation et la simulation du GPV (module *ET-M53620WW*) et des différents groupements possibles du modules PV étudiés (série, série/parallèle).L'analyse a montré également que la configuration série (chaîne PV) permettait d'augmenter la tension du GPV et la configuration série/parallèle (champs PV) permet d'augmenter la tension et le courant (la puissance) du GPV.

Le chapitre suivant portera sur l'étude et la simulation des convertisseurs DC-DC.

*CHAPITRE III:
CONVERTISSEURS DC/DC*

III.1 Introduction

Un GPV Peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Comme montré dans le chapitre précédent, Un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires, Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule, ce qui entraine une fluctuation sur le PPM. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Dans ce chapitre, nous étudierons le problème de connexion GPV-charge et la nécessité d'un étage d'adaptation. En effet, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge. Cet étage peut être un convertisseur DC-DC, abaisseur ou éleveur de tension, ou même un onduleur, dans le cas de besoin du courant alternatif. Pour cela, différentes topologies des convertisseurs DC-DC seront étudiées dans ce chapitre.

III.2 Connexion GPV-charge

III.2.1 Connexion direct

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge est le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté, il résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge. En plus, pour éviter la circulation d'un courant négatif vers le GPV, une diode anti-retour doit être placée comme le montre la figure III.1[12].

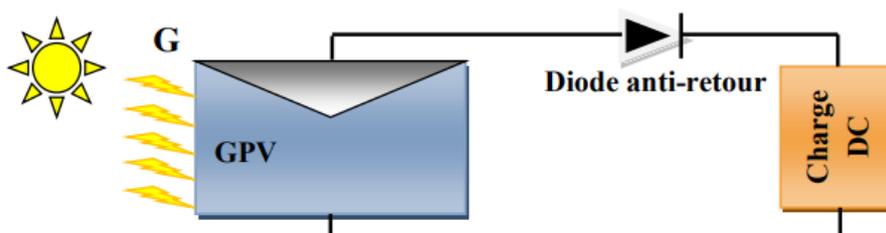


Figure III.1: connexion directe GPV-charge.

Cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Le transfert de la puissance maximale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas donc garanti, comme l'illustre la figure III.2

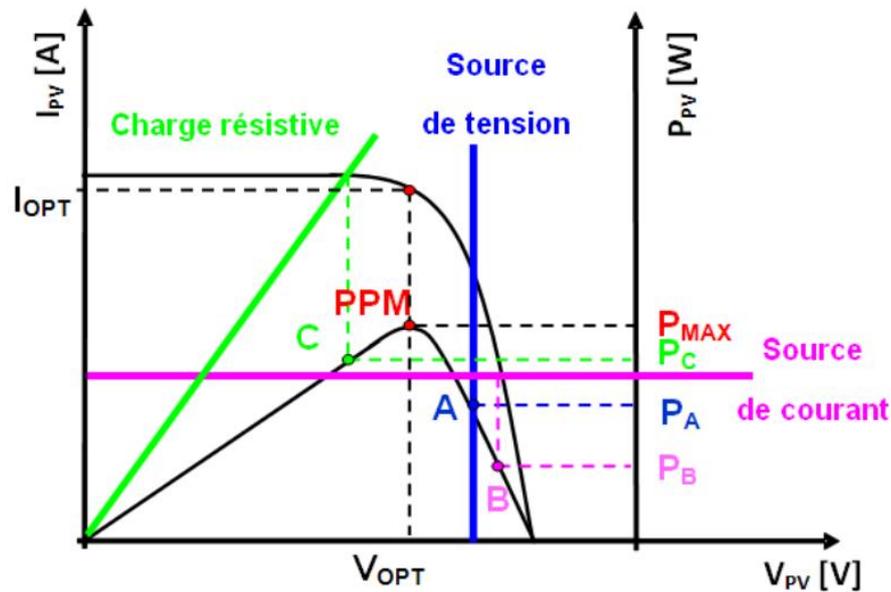


Figure III.2: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

D'après la figure (III.2), trois types de charges peuvent être connectées directement à un GPV

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continu,
- une charge purement résistive.

Pour les points de fonctionnement A, B et C, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A , P_B et P_C de valeurs inférieures à la puissance maximale P_{MAX} . La différence de puissance sera donc perdue et dissipée dans le générateur sous forme de chaleur[6]. D'autre part, certains types de charges ont besoin d'une source de tension alternative, or le GPV fournit un courant continu, la connexion directe est donc impossible dans ce cas. L'utilisation de la connexion directe est donc limitée, vu les pertes de production qu'elle entraîne et les limites de ses applications à des récepteur fonctionnant en courant continu[19].

III.2.2 Connexion indirecte via un étage d'adaptation

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, on doit insérer un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme il est décrit dans la figure III.3. L'étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible[20]

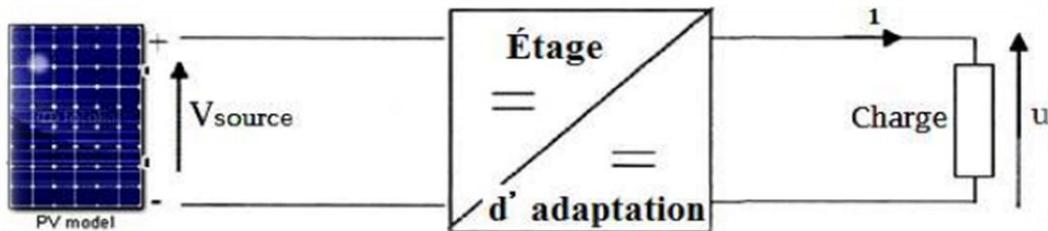


Figure III.3: Étage d'adaptation entre un GPV et une charge

Le circuit de base d'un système de poursuite du point de puissance maximale est un convertisseur DC/DC piloté par un circuit de commande, afin d'extraire la totalité de la puissance produite par le GPV (figure III.4).

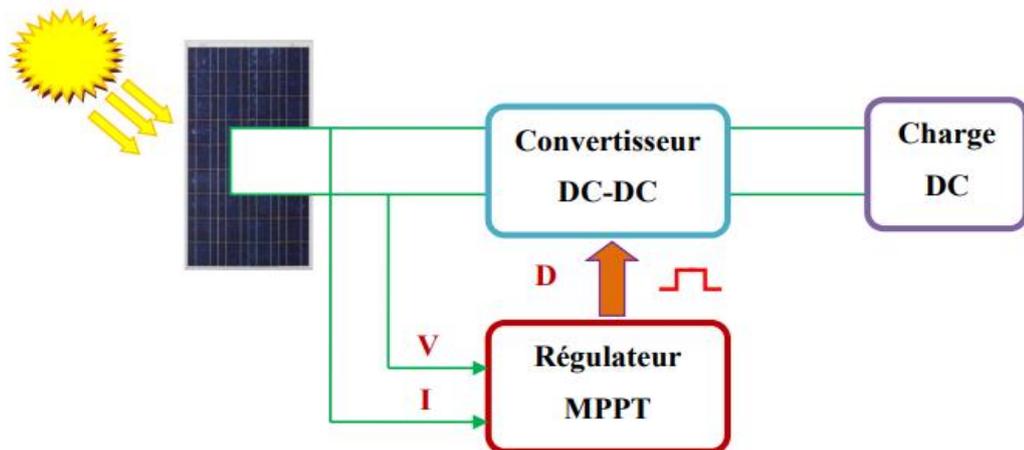


Figure III.4: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'une transformation DC Contrôler par une commande MPPT.

III.3 Convertisseurs DC-DC

Un Convertisseur DC-DC est un dispositif électrique qui permet de transformer une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau réglable de tension (ou de courant) figure III.5[21].

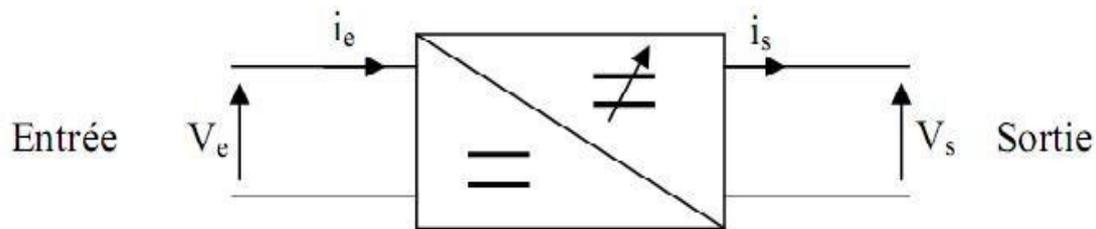


Figure III.5: Symbole d'un hacheur.

Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire l'adaptation entre le GPV et une charge DC pour avoir un transfert de puissance maximale. Le point de fonctionnement est donc maintenu au voisinage du PPM quelles que soient les conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, variation de charge, etc.). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

III.3.1 Structure de base des convertisseurs DC-DC

Le circuit d'un hacheur se compose essentiellement de condensateur, inductance et de semi-conducteur. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle ces convertisseurs ont un bon rendement[22].

Les semi-conducteurs sont :

- Les diodes.
- Les interrupteurs commandables.

p.s : Nous allons considérer par la suite des montages hacheurs tel que : la source d'entrée du convertisseur est une source de tension continue V_e , La sortie est également considérée comme une source de tension continue V_s et la charge est assimilable à une résistance R .

III.3.2 Les types des convertisseurs DC-DC

Trois types des convertisseurs statiques sont généralement utilisés :

- Le convertisseur élévateur de tension (hacheur parallèle ou BOOST),
- Le convertisseur abaisseur de tension (hacheur série ou BUCK),
- Le convertisseur élévateur-abaisseur de tension (hacheur série-parallèle ou BUCK-BOOST)

III.3.2.1 Hacheur série (Buck)

Le hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur (Figure III.6). La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant, cette topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Un convertisseur Buck bien conçu possède un fort rendement (jusqu'à 95 %) et offre la possibilité de réguler la tension de sortie[23].

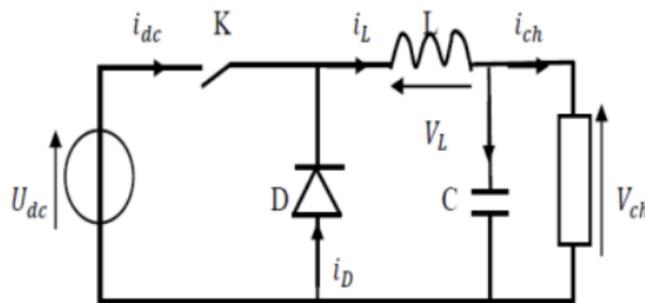


Figure III.6:hacheur abaisseur.

III.3.2.2 Hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost (Figure III.7), la source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur BOOST pour augmenter la tension distribuée à l'étage de l'onduleur[22].

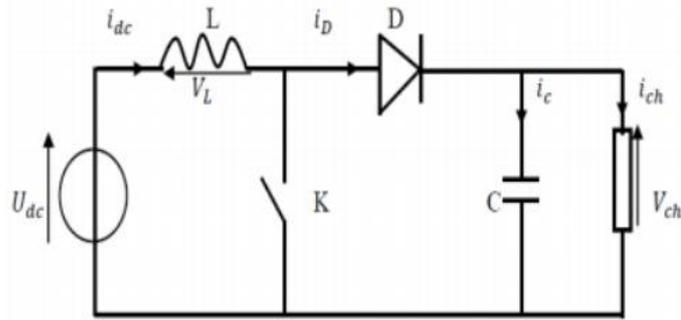


Figure III.7:hacheur élévateur.

III.3.2.3 Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)

Le hacheur abaisseur-élévateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost (Figure III.8). Le hacheur abaisseur-élévateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive)[21]. Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents.

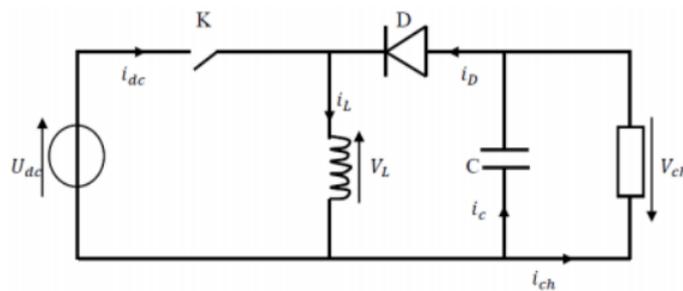


Figure III.8:Hacheur abaisseur-élévateur

Le tableau III.1 représente les gains en tension des différents convertisseurs continu-continu.

Tableau III.1:Gain en tension des convertisseurs[22]

Topologie	BOOST	BUCK	BOOST-BUCK
Gain en tension	$\frac{1}{(1 - D)}$	D	$\frac{D}{(1 - D)}$

D : désigne le rapport cyclique du convertisseur

Le présent travail est basé sur le convertisseur BOOST.

III.4 Le principe de fonctionnement d'un convertisseur Boost

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit électrique équivalent (figure III.9), et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/ sortie.

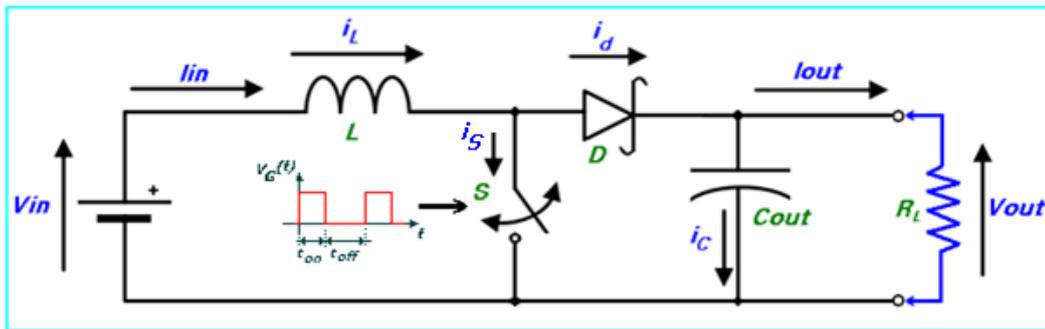


Figure III.9: Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "Boost".

Ici, le commutateur S , qui est souvent un transistor MOSFET, est actionné via un signal de commande de forme rectangulaire à la fréquence de commutation:

$$f_s = \frac{1}{T} \tag{III.1}$$

T : étant la période du signal de commande.

Et avec un rapport cyclique D défini comme étant le rapport de fermeture du commutateur t_{on} et la somme $T = t_{on} + t_{off}$ des temps de fermeture et d'ouverture de ce commutateur:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \tag{III.2}$$

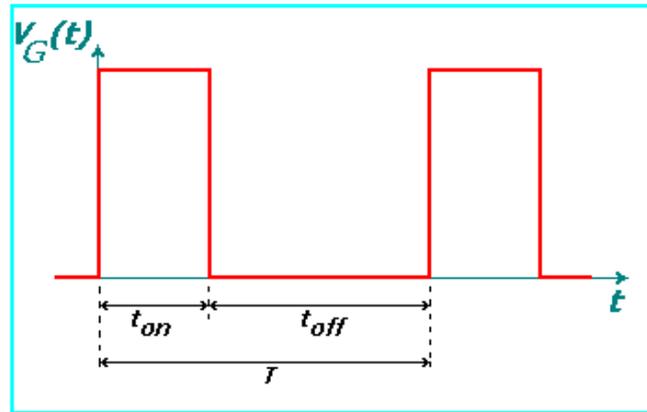


Figure III.10: Forme du signal de commande du commutateur S.

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases différentes selon l'état de l'interrupteur S :

➤ Lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant) :

Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$ le courant dans l'inductance va augmenter, et une énergie sous forme d'énergie magnétique est stockée. La diode est donc bloquée, et la charge sera déconnectée de la source.

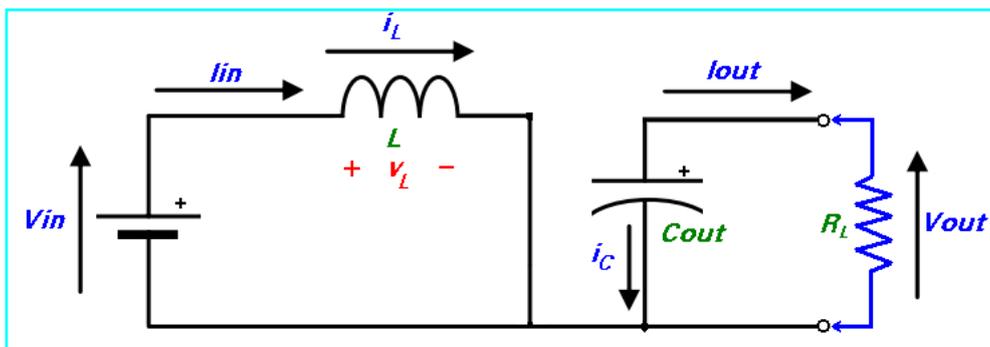


Figure III.11: Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps DT.

Dans ce cas I_L augmente à un taux de:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}}{L} \tag{III.3}$$

En intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que :

$$I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{L}t + I_{Lmin} \tag{III.4}$$

On voit bien que $I_L(t)$ a une pente positive, ce qui prouve que durant cette phase l'inducteur se charge.

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{L\text{on}} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_{in} dt}{L} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L} \quad III.5$$

➤ Lorsque l'interrupteur "S" est ouvert.

Pour $DT \leq t \leq (1-D)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre., l'inductance est alors en série avec le générateur et sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur. L'énergie cumulée dans l'inductance va être donc transférée vers la capacité

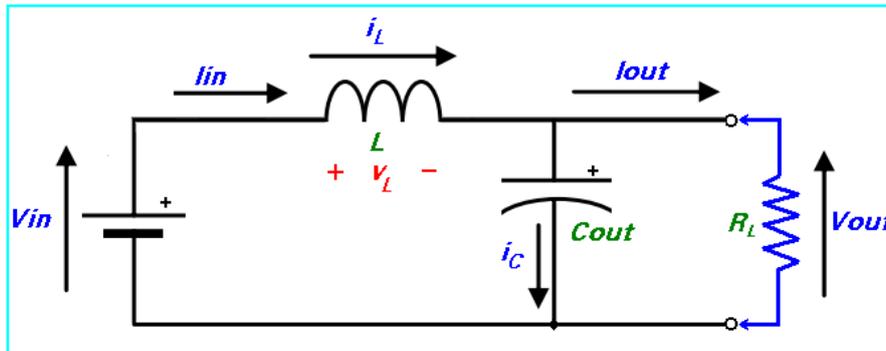


Figure III.12: Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1-D)T$.

Dans ce cas, I_L diminue avec un taux de :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad III.6$$

La variation de I_L durant cet état bloqué en intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que

$$\Delta I_{L\text{off}} = \int_{DT}^T dI_L = \int_{DT}^T \frac{(V_{in} - V_{out}) dt}{L} = \frac{(V_{in} - V_{out})(1-D)T}{L} \quad III.7$$

On remarque que durant les deux phases de conduction (selon que le commutateur "S" est fermé ou ouvert) I_L oscille (augmente puis diminue) dans une bande de largeur ΔI_L autour d'une valeur moyenne $I_{L\text{moy}} = I_{in}$. Voir figure ci-dessous.

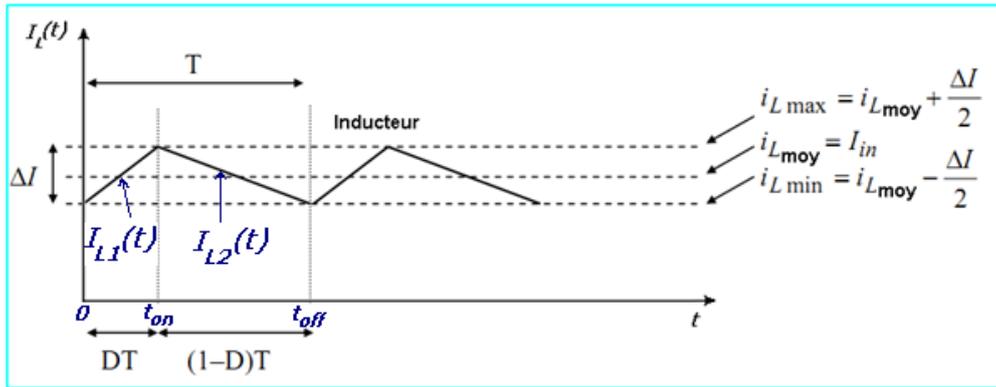


Figure III.13: variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.

A travers la courbe d'évolution de $I_L(t)$, on voit bien que pour garantir un fonctionnement en mode de conduction continu, i.e. un courant d'inducteur non nul, il faut toujours respecter la condition suivante :

$$i_{Lmin} \geq 0 \tag{III. 8}$$

Ce qui est équivalent à:

$$I_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{2} \tag{III. 9}$$

La quantité d'énergie emmagasinée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. Par conséquent, le courant I_L est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui permet d'écrire[24]

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \tag{III. 10}$$

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_{in} - V_{out})(1 - D)T}{L} = 0. \tag{III. 11}$$

Après simplifications, nous pouvons réécrire cette équation de la façon suivante :

Ce qui donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_{out} .

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1 - D)} \tag{III. 12}$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec D , et que théoriquement elle peut être infinie lorsque D se rapproche de 1.

Et puisque par hypothèse, on avait :

$$P_{in} = P_{out} \quad III.13$$

Nous aurons également :

$$I_{out} = (1 - d) \cdot I_{in} \quad III.14$$

Dans le cas où: le rendement énergétique de l'étage est : $\eta \neq 1$, chose qui est trop proche de la réalité pratique. Nous pourrions également écrire:

$$V_{out} = \eta \cdot \frac{V_{in}}{(1 - D)} \quad III.15$$

$$\text{et } I_{out} = \eta \cdot (1 - D) \cdot I_{in} \quad III.16$$

III.4.1 Dimensionnement des composants électroniques du hacheur Boost

Dans un convertisseur bien conçu dans l'état d'équilibre il devrait n'y avoir aucun entraînement significatif sur l'intensité et la tension pendant une période de commutation. Cependant il est important de dimensionner l'inductance et la capacité afin de calculer la valeur de l'inductance et la capacité[24]

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source. Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

III.4.1.1 Calcul de l'inductance L :

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne.

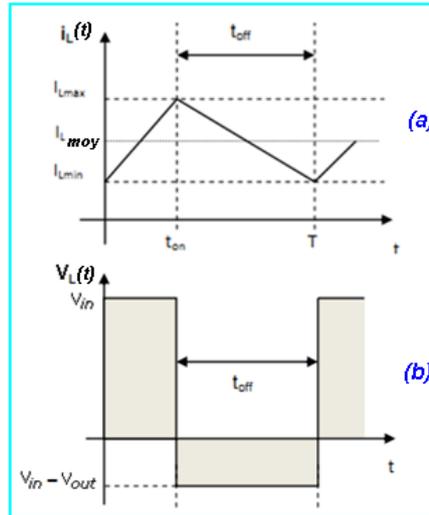


Figure III.14: Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T.

En utilisant l'équation III. 5 et l'équation III. 9 on peut écrire

$$\Delta I_L = |\Delta I_{Lon}| = |\Delta I_{Loff}| = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L} \quad \text{Avec } T = \frac{1}{f_s} \quad \text{III. 17}$$

Avec

$$I_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{2} \quad \text{III. 18}$$

Et puisque dans le cas d'une connexion à un panneau photovoltaïque, on a:

$$I_{in} = I_{PV} \text{ et } V_{in} = V_{PV} \quad \text{III. 19}$$

Nous aurons finalement:

$$L \geq L_{min} = \frac{V_{PV} \cdot D}{2 \cdot I_{PV} \cdot f_s} \quad \text{III. 20}$$

On a

$$R_{IN} = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad \text{III. 21}$$

En remplaçant Vin et In par leurs expressions dans les équations (III.12) et (III.14) on trouve:

$$R_{IN} = \frac{(1 - D)^2 \cdot V_{out}}{I_{out}} \quad \text{III. 22}$$

Ce qui donne par la fin :

$$R_{IN} = (1 - D)^2 \cdot R_L \quad \text{III. 23}$$

A partir de ces dernières équations, l'équation(III.20) peut se mettre sous la forme :

$$L \geq L_{min} = \frac{(1 - D)^2 \cdot D \cdot R_L}{2 \cdot f_s} \quad III.24$$

Et pour être plus précis encore, nous mettrons:

$$L \geq \max\left(\frac{(1 - D)^2 \cdot D \cdot R_L}{2 \cdot f_s}\right) \quad III.25$$

Généralement, en pratique on prend $L \geq 10 \cdot L_{min}$ comme marge admissible pour fixer la valeur préconisée de L .

III.4.1.2 Calcul du condensateur

Le condensateur C est nécessaire pour filtrer la tension de sortie et minimiser l'ondulation de tension de sortie. Il obéit aux règles de dimensionnement classiques en Electronique de Puissance. Pour le dimensionner, on suit le raisonnement suivant :

La forme d'onde de courant traversant le condensateur de sortie est donnée par la (Figure III.15). L'aire du rectangle en bleu représente la quantité de charge perdue durant une période (Qui est la même que celle emmagasinée durant une période)[7]. Et puisque le calcul d'aire du rectangle s'apprête mieux pour le calcul de la variation de charge dans ce cas, nous avons utilisé cet intervalle pour avoir une idée sur la variation de charge dans ce condensateur durant une période de commutation[24].

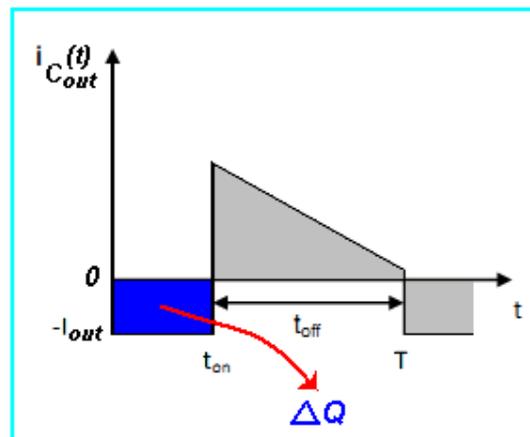


Figure III.15: Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur C_{out} durant une période de commutation T .

Nous aurons donc:

$$\Delta Q = D \cdot T \cdot I_{out} \quad III.26$$

La relation charge-tension est donnée par :

$$\Delta Q = C_{out} \cdot \Delta V_{out} \quad III.27$$

En combinant cette dernière équation avec l'équation précédente, on aura:

$$C_{out} \geq \frac{D \cdot I_{out}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} = \frac{D \cdot (1 - D) I_{in}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} = \frac{D \cdot (1 - D) I_{PV_max}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad III.28$$

III.5 Avantage de convertisseur BOOST :

Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur Boost peut être plus approprié aux SPV avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur Boost peut être plus grand que le convertisseur Buck. Le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie.

III.6 Simulation du convertisseur élévateur

Nous avons simulé un convertisseur DC/DC élévateur de tension par le biais du logiciel Matlab (fig .III.16)

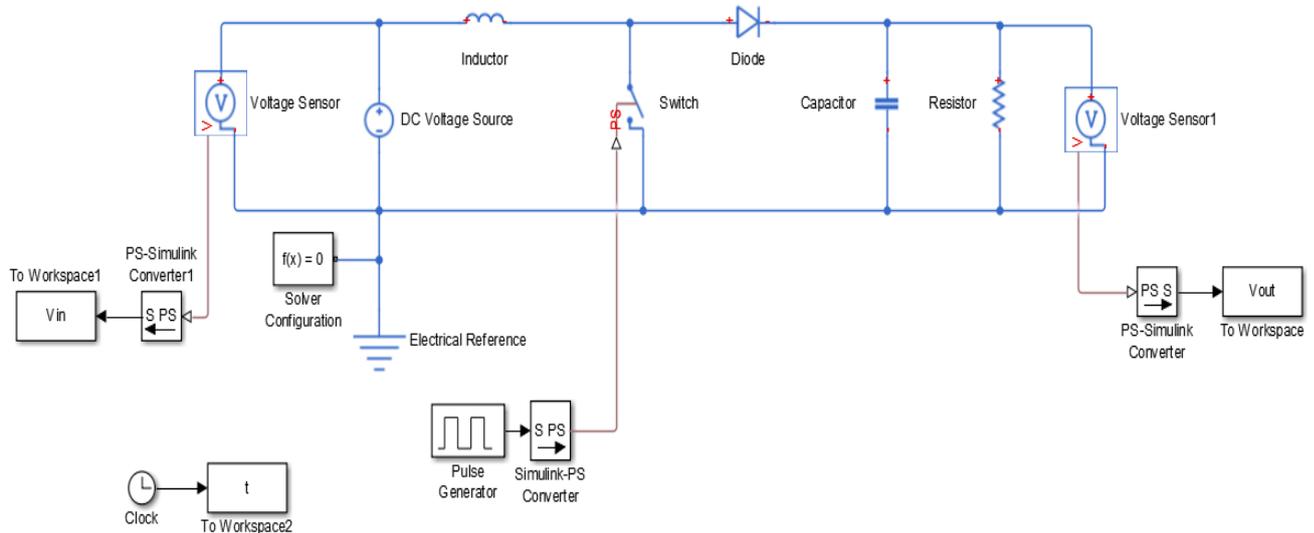


Figure III.16:schéma bloc de simulation du convertisseur Boost.

III.6.1 Calcul des composants constitutifs du hacheur Boost utilisé

Afin de calculer les valeurs minimales de L et C en utilisant les formules citées précédemment, nous allons dimensionner les valeurs des composants du hacheur Boost pour trois différentes valeurs de rapport cyclique, nous avons :

➤ **Données de simulations**

- $V_{in} = 10V$,
- $f_s = 25 \text{ KHz}$,
- $\Delta V_{out} = 0,5V$,
- $R_L = 55\Omega$

Avec $I_{out} = V_s / R_L$

Ce qui donne après tout calcul fait

Tableau III.2: calcul des composants du hacheur Boost

	$V_{in}(V)$	D	$V_{out}(V)$	$I_{out}(A)$	$L_{min}(mH)$	$C_{min}(\mu F)$
Cas 1	10	0.1667	12	0.2182	0,127	2,424
Cas 2		0.3333	15	0.2727	0,16	4,823
Cas 3		0.5	20	0.3636	0,137	7,272

III.6.2 Résultats de la simulation

Le rapport cyclique pour un convertisseur Boost est :

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad III.37$$

Les figures III.17, III.18, III.19 montrent les résultats de simulation d'un convertisseur Boost, dont on a fixé la tension d'entrée $V_{in} = 10V$, et le rapport cyclique est donné en fonction de la tension de sortie souhaitée.

- Pour avoir une tension de sortie $V_{out} = 12V$, on doit fixé le rapport cyclique à $D=20\%$

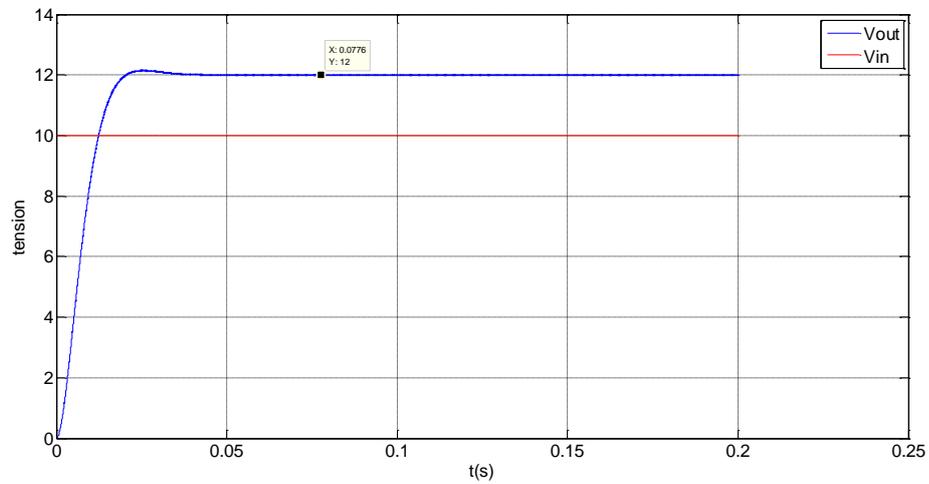


Figure III.17 : Tension de sortie 12V du convertisseur Boost.

- Pour avoir une tension de sortie $V_{out} = 15V$, on doit fixé le rapport cyclique à $D=33\%$

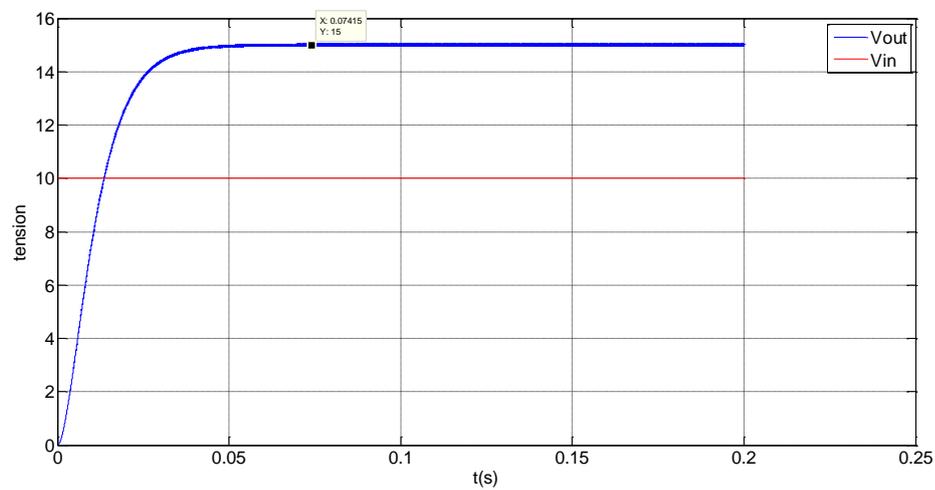


Figure III.18: Tension de sortie 15V du convertisseur Boost.

- Pour avoir une tension de sortie $V_{out} = 20V$, on doit fixer le rapport cyclique à $D=50\%$

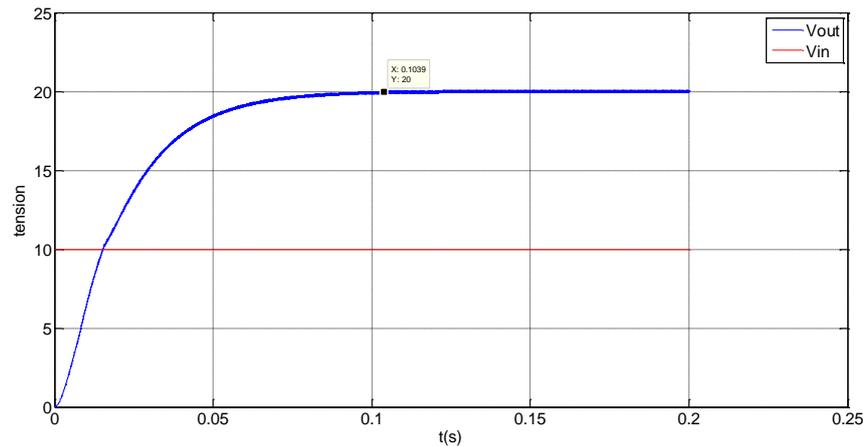


Figure III.19:Tension de sortie 20V du convertisseur Boost.

Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur. Ces résultats montrent que la tension de sortie du hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée, son régime transitoire est faiblement oscillant et il devient constant au régime permanent. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les convertisseurs DC-DC nommés « hacheurs », leurs différents types ainsi que leurs éléments constitutifs.

Nous nous sommes intéressés à l'hacheur Boost en particulier dont nous avons détaillé son fonctionnement ainsi que le dimensionnement de ses paramètres à savoir l'inductance et la capacité qui servent respectivement à limiter l'ondulation du courant et celle de tension.

Nous avons montré par simulation que la valeur de la tension de sortie est réglable en contrôlant la valeur du rapport cyclique et que lorsque la tension de sortie augmente, les éléments passifs changent de valeurs, donc il faut faire un choix précis et judicieux des valeurs de l'inductance et de la capacité.

CHAPITRE IV:
ETAGE
D'ADAPTATION
CONTROLE PAR LA
COMMANDE MPPT

IV.1 Introduction

Dans le but d'atteindre la valeur optimale du GPV, l'étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT, qui va agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC en fonction des variations des conditions météorologiques ou de la charge pouvant survenir.

Dans ce sens, nous présenterons dans ce chapitre le fonctionnement à puissance maximale et les différents types de commandes MPPTs. Par la suite, nous donnerons les résultats de simulation qui montrent la recherche du point de puissance maximale pour différentes valeurs d'ensoleillement en utilisant les deux algorithmes « Perturbation et Observation » et « Incrémentation de conductance ». Finalement, on fera une étude comparative entre ces deux algorithmes.

IV.2.Principe de fonctionnement de la commande MPPT

Une commande MPPT, de l'anglais (Maximum Power Point Tracker), est une commande associée à un étage d'adaptation (convertisseur continu-continu) permettant de faire fonctionner le GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance [14]. La technique de contrôle permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge, donc elle consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment[25].

La figure IV.1 illustre deux cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM vers un nouveau point PF de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Comme la montre la figure IV.1-A, pour une puissance incidente E1, la puissance optimale transférée à la charge est le point PPM1. Si la puissance incidente change (E2), alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point PF (FigIV.1-A). Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans une moindre mesure, un cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas B)[26].

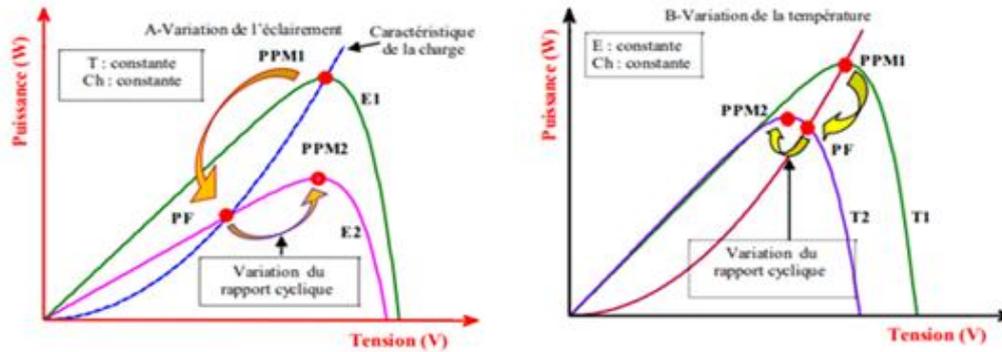


Figure IV.1: Variation du Point de Puissance Maximal avec l'éclairement et la température

Le contrôle MPPT (**figure III.4**) fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, qui influe sur le sens de la variation de tension de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible à ses bornes.

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV à son point de puissance maximale PPM, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction des conditions climatiques.

Plusieurs algorithmes sont présents dans la littérature, nous présentons quelques-uns plus loin dans ce chapitre mais nous nous centrerons sur l'algorithme P&O et INC.[27]

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes. [28]

IV.2.1 Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} 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 pouvant fonctionner dans des zones géographiques où il y'a peu de

changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

IV.2.2 Méthodes directes

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 (PF) 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 PF réel oscille alors autour du MPP[17]. 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 haute puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement[29].

La détermination de la valeur de la puissance du GPV, 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. Parmi ces méthodes, on s'intéressera principalement, à la méthode P&O et l'INC.

IV.3 Algorithmes MPPT

IV.3.1 MPPT Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme P&O est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité implémentation dans le microprocesseur. Le principe de la commande MPPT P&O, consiste à perturber la tension d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'observer le comportement de la variation de puissance qui en résulte[30].

Ainsi on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension engendre un accroissement de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P-V, il

est alors facile de situer le PF par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié[27].

Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la figure (IV.2) et récapitulés dans le Tableau (IV.1)[17].

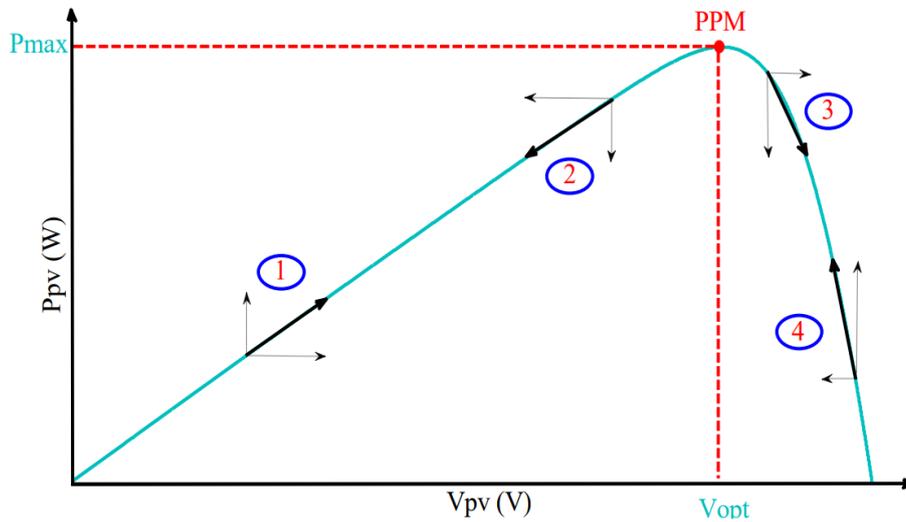


Figure IV.2:Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O

Tableau IV.1: Principe de l’algorithme P&O

Cas n°	ΔV_{pv}	ΔP_{pv}	$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref}=V_{ref}+C$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref}=V_{ref}+C$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref}=V_{ref}-C$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref}=V_{ref}-C$

IV.3.1.1 Organigramme de P&O

La figure (IV.3) montre l'organigramme de l'algorithme P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. L'algorithme P&O est basé sur; le calcul de la puissance

de sortie $P_{pv}(n)$, la variation de puissance instantanée ($\Delta P_{pv} = P_{pv}(n) - P_{pv}(n-1)$) et la comparaison de la tension actuelle et précédente ($\Delta V_{pv} = V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)$), afin de calculer une tension de référence (V_{ref}). Cette dernière est la consigne de la régulation de la tension de sortie du GPV. En effet, la méthode (P&O) essaye toujours de faire osciller l'entité (dP/dV) autour de zéro en procédant périodiquement à incrémenter ou décrémenter la tension de sortie du générateur PV[15]. L'organigramme de la méthode du contrôle P&O est schématisé dans la figure IV.3:

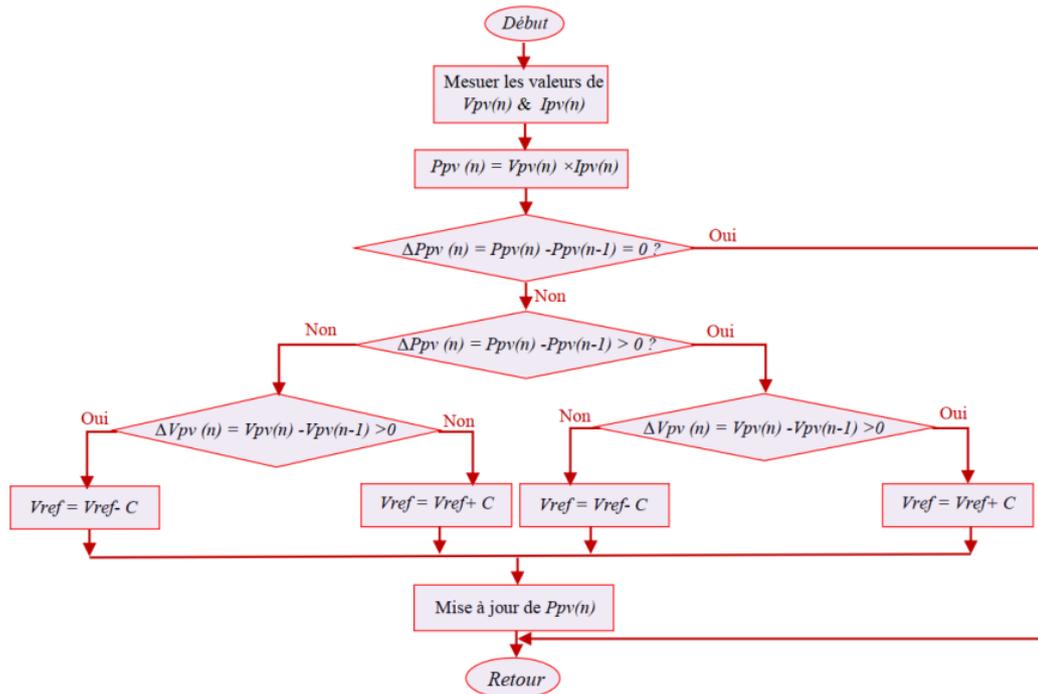


Figure IV.3: Organigramme de l'algorithme P&O.

IV.3.2 MPPT Incrémentation de la Conductance (INC)

La technique Incrémentation de la Conductance, en anglais : Incremental conductance « INC » est, comme la méthode P&O, très utilisée pour la recherche de la puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques[25, 31]. Elle est relativement simple et performante et elle fonctionne correctement pour les très fortes variations des conditions climatiques, notamment l'irradiation. Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du PF, autrement dit la pente de la dérivée de la puissance par rapport à la tension de la courbe de puissance-tension (P-V) du GPV soit nulle au point de puissance max MPP, positive à gauche du MPP et négative à droite Figure IV.4[32].

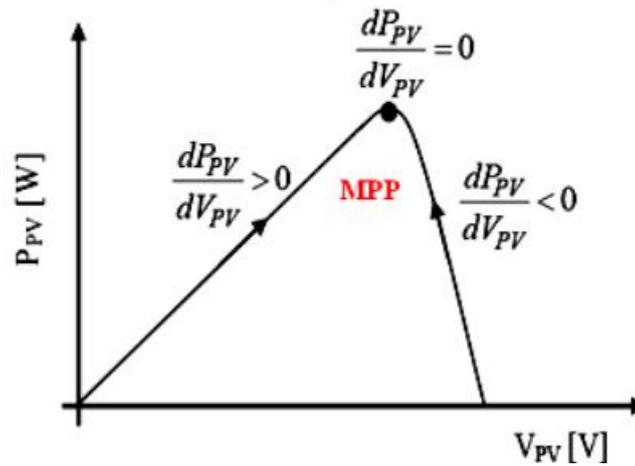


Figure IV.4:Signe de la pente de la puissance sur la courbe P-V.

La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module PV sont définies respectivement par [12]

$$G = \frac{I}{V} \quad \text{IV. 1}$$

$$dG = \frac{dI}{dV} \quad \text{IV. 2}$$

Sachant que le courant du panneau dépend de la tension, la dérivée de la puissance par rapport à la tension peut s'écrire :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad \text{IV. 3}$$

A partir de l'équation (IV-3), on peut tirer les conclusions suivantes :

- Si $\frac{dP}{dV} = 0 \implies \frac{dI}{dV} = -\frac{1}{V} \implies P = P_{\max}$
- Si $\frac{dP}{dV} > 0 \implies \frac{dI}{dV} > -\frac{1}{V} \implies P$ à gauche de P_{\max}
- Si $\frac{dP}{dV} < 0 \implies \frac{dI}{dV} < -\frac{1}{V} \implies P$ à droite de P_{\max}

Le MPP est donc recherché par la comparaison entre la conductance G et l'incrément de la conductance $dG=(dI/dV)$ instantanées. Une fois le MPP est trouvé, on ne change plus la tension jusqu'à une variation du courant[10]. Dans ce cas, l'algorithme commence de nouveau la recherche du nouveau MPP fig IV.5

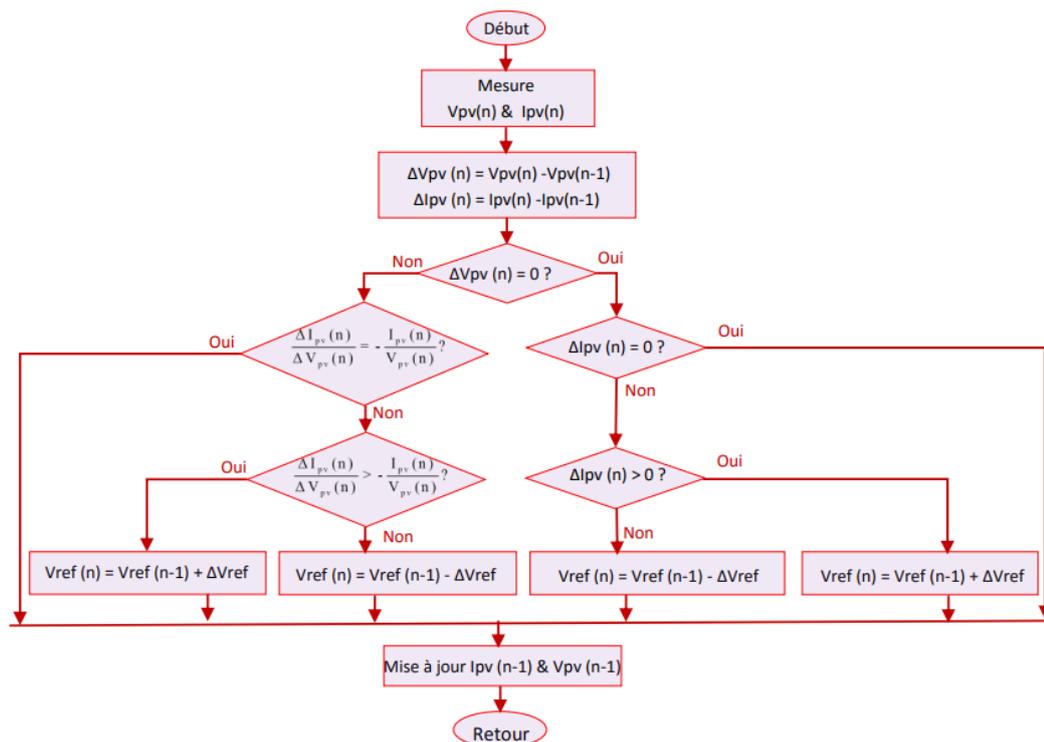


Figure IV.5: Organigramme de la méthode INC.

IV.4 Simulation d'un système PV autonome

Pour réaliser cette simulation, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Générateur PV ET-M53620WW
- Convertisseur DC-DC de type survolteur "Boost".
- Algorithme MPPT P&O/INC
- Un générateur PWM:(MLI, Modulation de largeur d'impulsion) le générateur PWM produit un signal de fréquence constante et de rapport cyclique variable. Le principe de fonctionnement de commande PWM consiste à comparer un signal triangulaire (la porteuse) avec un signal continu (signal de référence).
- Charge résistive $R_S = 150 \Omega$.

Les figures (IV.6) ci-dessous présentent le schéma bloc de la simulation d'un SPV muni d'algorithme MPPT.

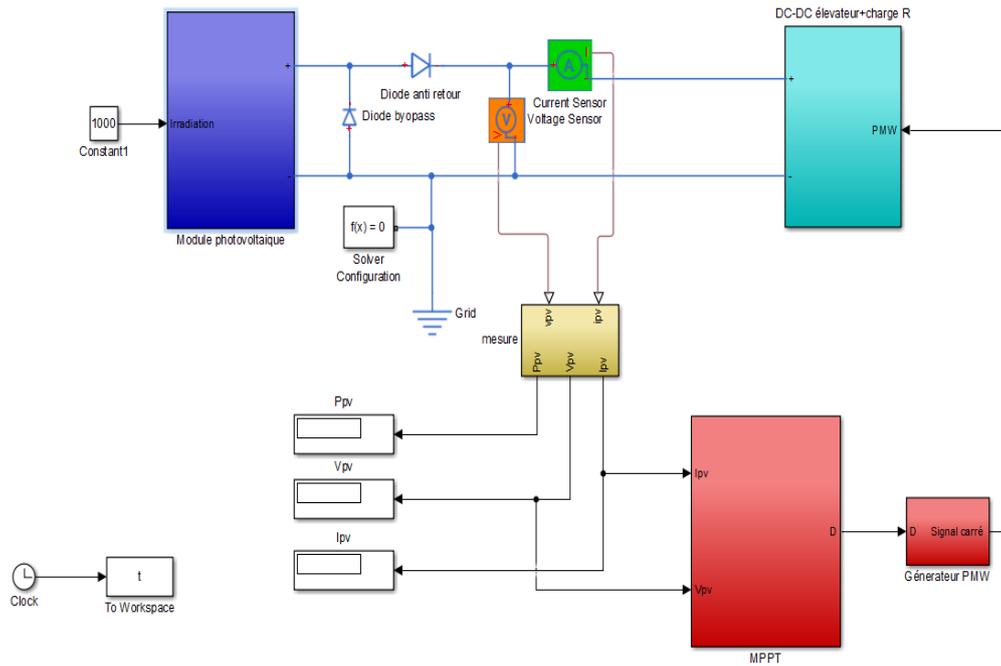


Figure IV.6: Schéma bloc de la simulation d'un système PV.

IV.4.1 Implémentation de l'algorithme P&O

Le schéma de simulation de l'algorithme P&O sous Matlab/Simulink est donné par la figure suivante :

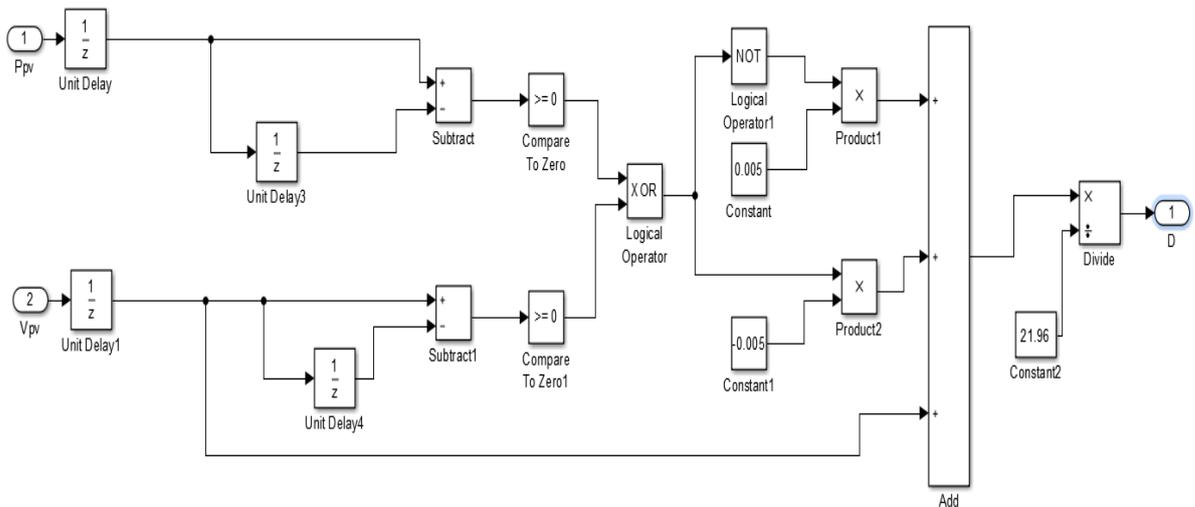


Figure IV.7: Schéma bloc de l'algorithme P&O.

IV.4.1.1 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables

Pour cette série de simulations, les paramètres température T et d'ensoleillement G sont maintenus constamment égaux aux valeurs d'essais standards qui sont respectivement $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{ W/m}^2$. L'intérêt majeur sera focalisé sur les ondulations au niveau de la puissance.

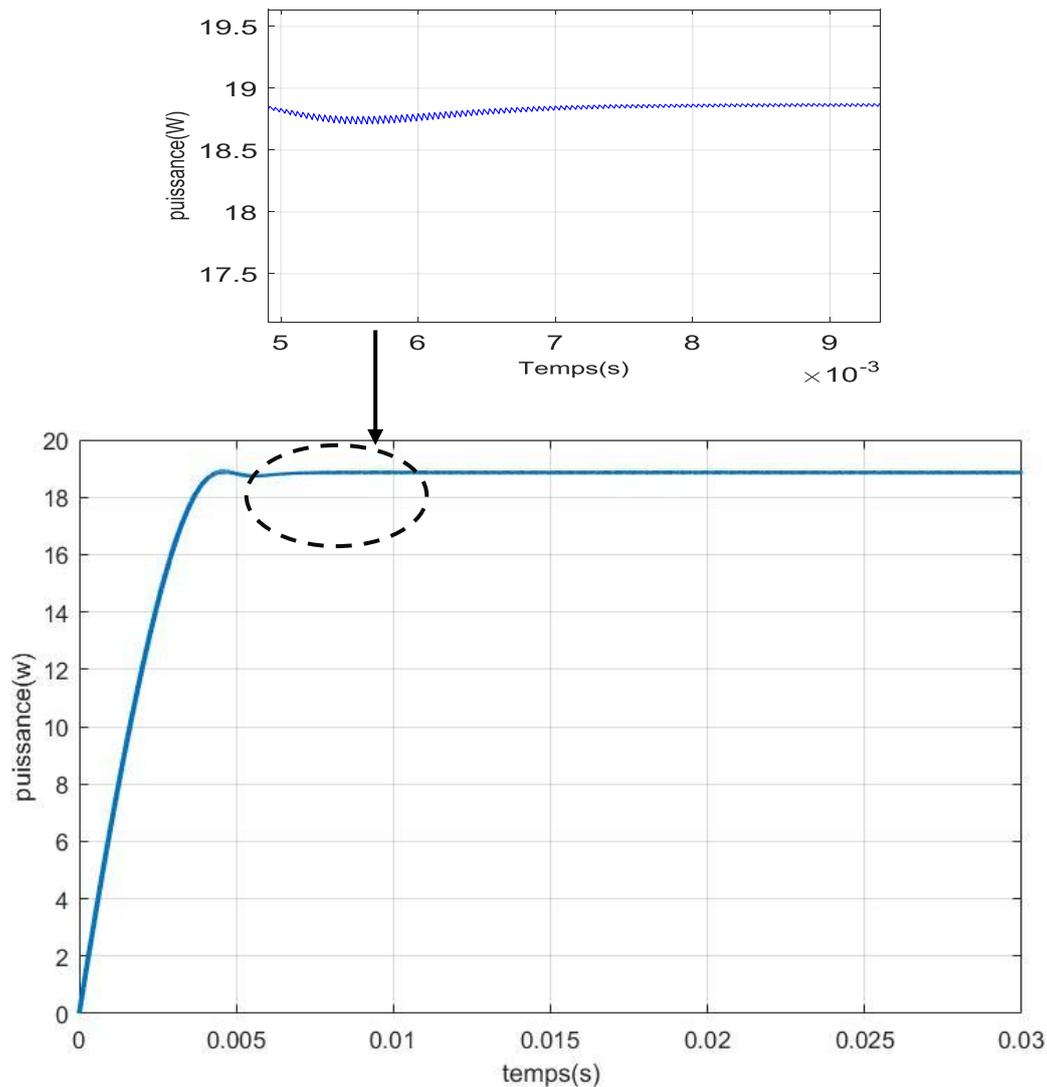


Figure IV.8: simulation de la méthode P&O ($G=1000\text{ W/m}^2$)

Interprétation des résultats :

Après un régime transitoire d'une durée de 0.04s, la commande MPPT P&O a pu atteindre le point de fonctionnement PPM. Néanmoins, il présente des oscillations en régime permanent.

IV.4.1.2 Fonctionnement pour des éclairagements variables

➤ En poursuite

Pour une température interne fixée à 25°C, on simule une augmentation de l'éclairément de 400W/m² à 900W/m² pendant 0.01 secondes. On refait l'expérience, dans l'autre sens, en diminuant lentement l'éclairément de 900W/m² à 400W/m² durant le même laps de temps.

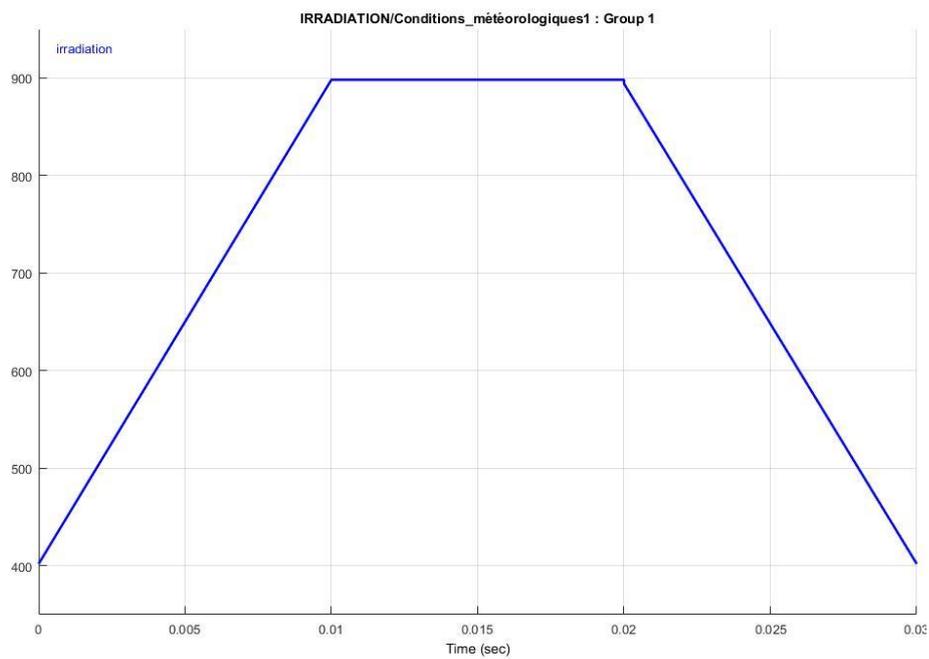


Figure IV.9: Variation de l'éclairément en fonction du temps (profil lent)

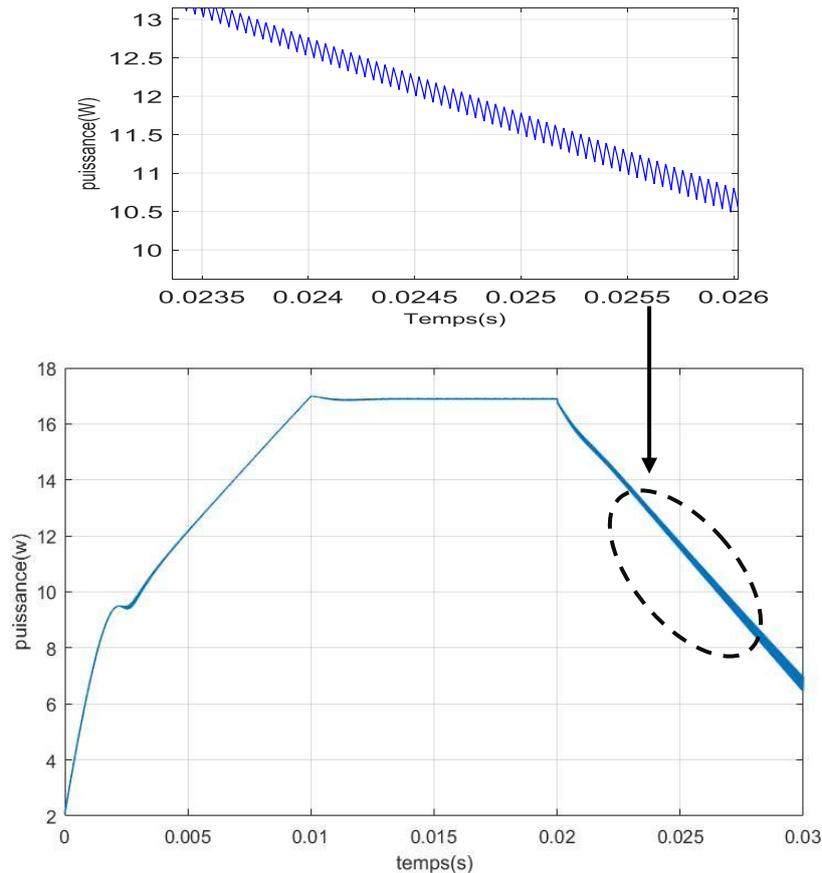


Figure IV.10:simulation de la méthode P&O(profil lent)

Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement, de ce fait on constate que la commande P&O poursuit parfaitement l'évolution du PPM imposé par le changement d'éclairement avec un temps de réponse très rapide. Mais on constate aussi que la courbe de la puissance présente de fortes oscillations dans le régime permanent. Comme le montre la figure IV.10

➤ En échelon

Pour une température interne fixée à 25°C, on simule une augmentation brusque de l'éclairement de 700W/m² à 900W/m² pendant 0.01 secondes. On refait l'expérience, dans l'autre sens, en diminuant brusquement l'éclairement de 900W/m² à 700W/m² durant le même laps de temps.

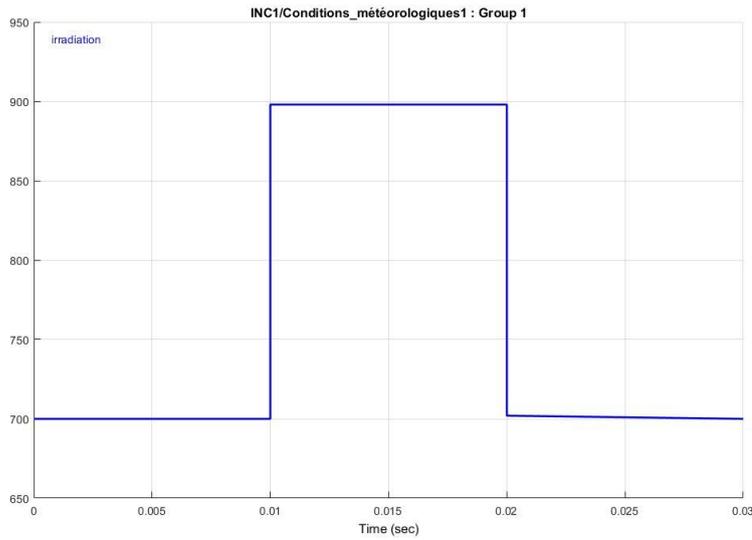


Figure IV.11: Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil rapide)

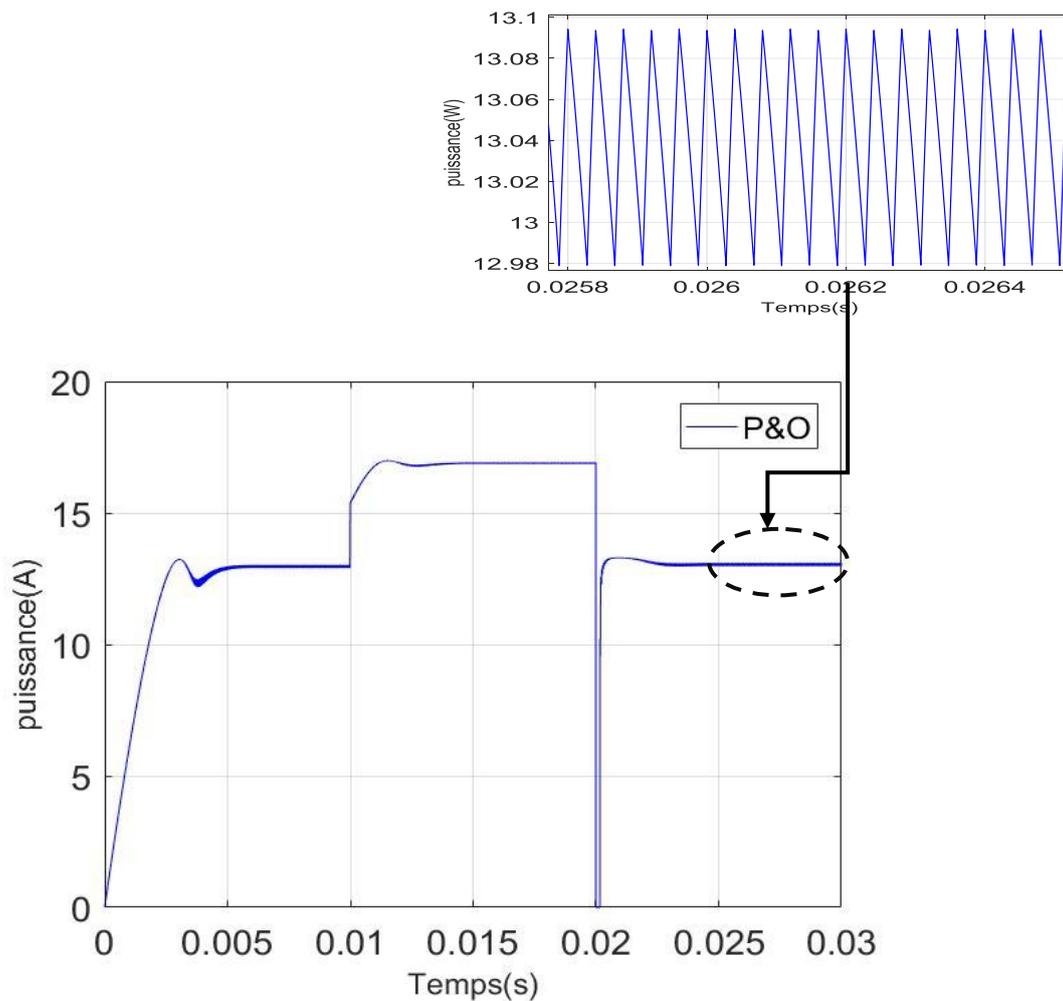


Figure IV.12: simulation de la méthode P&O (profil rapide)

Interprétation des résultats :

Pour ce cas de figure nous remarquons que l'algorithme P&O n'a pas pu suivre exactement la pente de la variation de l'insolation, elle n'a rattrapé le PPM qu'après l'écoulement de 0.004s de variation de l'insolation ce qui est défavorable en terme de dissipation de puissance. Car une augmentation brutale de l'ensoleillement produit une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme considèrera cette augmentation comme étant dû à la perturbation introduite durant le dernier cycle donc, il continue à perturber le système dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui engendre une déviation du point de fonctionnement du vrai , elle présente aussi de fortes oscillations autour du MPP en régime permanent. PPM.

IV.4.2 Implémentation de l'algorithme INC

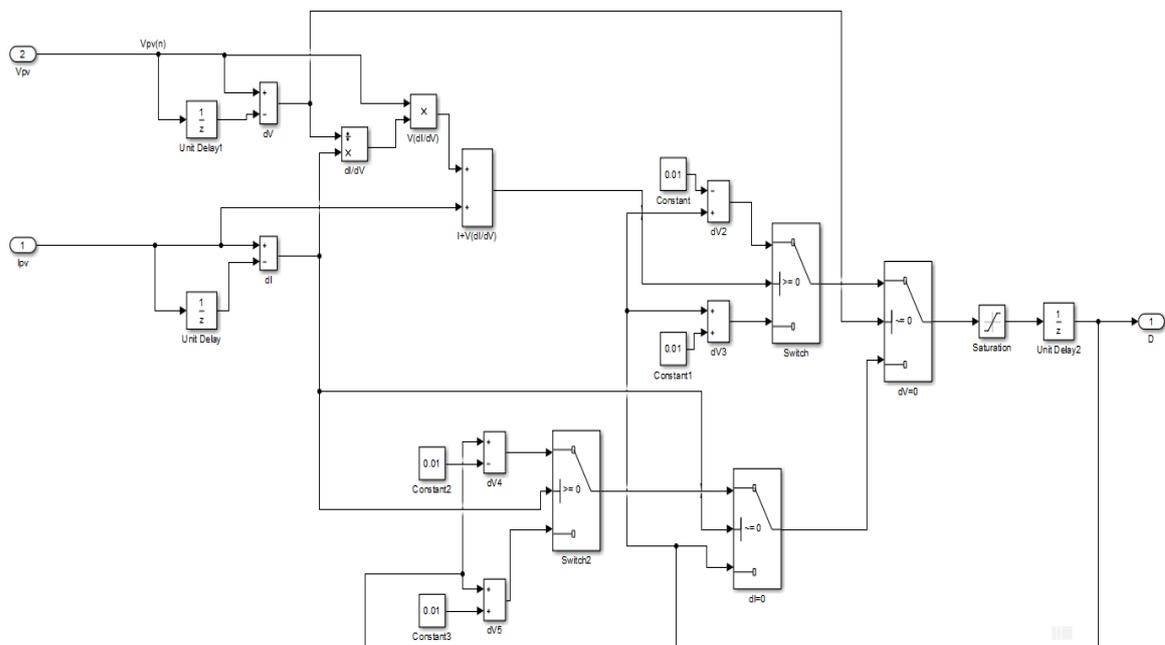


Figure IV.13: Schéma bloc de l'algorithme INC.

IV.4.2.1 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables

Pour cette série de simulations, les paramètres température T et d'ensoleillement G sont maintenus constamment égaux aux valeurs d'essais standards qui sont respectivement T=25°C et G=1000 W/m².

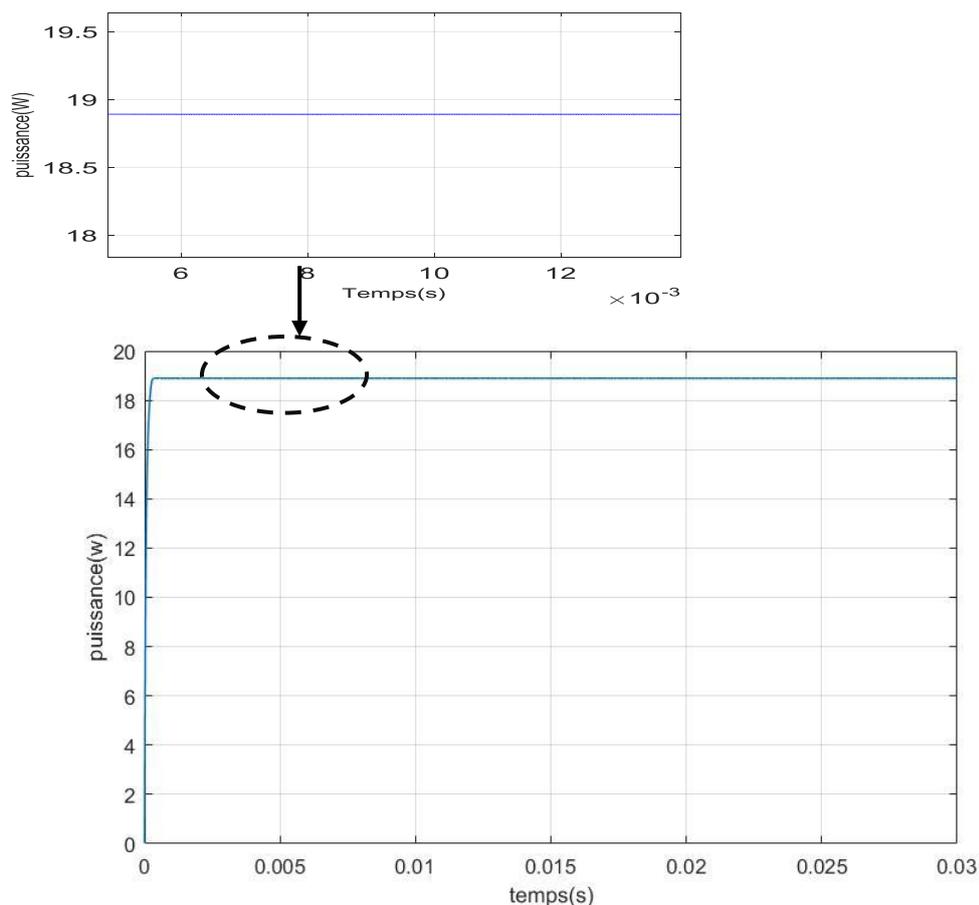


Figure IV.14: simulation de la méthode INC pour ($G=1000 \text{ W/m}^2$)

Interprétation des résultats :

Selon la figure (IV.14), il est clair que la commande INC arrive au MPP dans un temps très court. En régime permanent, la commande INC présente une stabilité de poursuite de MPP, sans oscillations.

IV.4.2.2 Fonctionnement pour des éclairagements variables

➤ En poursuite

Comme pour la méthode P&O et Pour une température interne fixée à 25°C , on simule une augmentation de l'éclairement de 400W/m^2 à 900W/m^2 pendant 0.01 secondes. On refait l'expérience, dans l'autre sens, en diminuant lentement l'éclairement de 900W/m^2 à 400W/m^2 durant le même laps de temps.

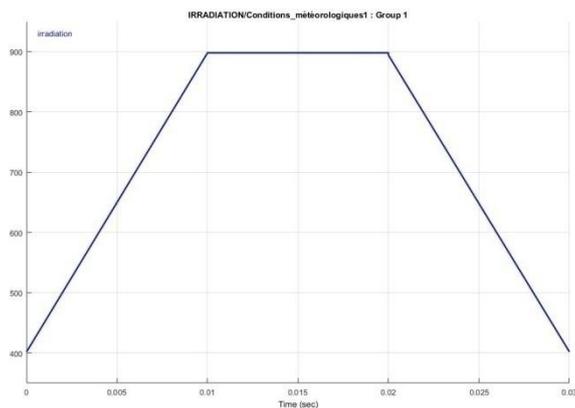


Figure IV.15: Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil lent)

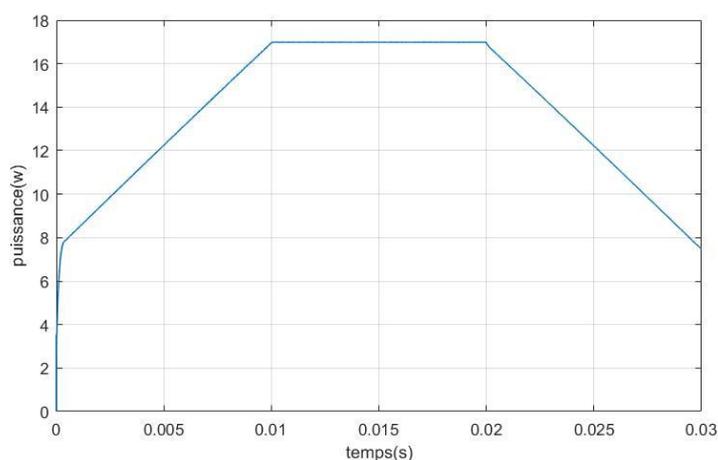


Figure IV.16: simulation de la méthode INC (profil lent)

Interprétation des résultats :

La figure (IV.16) montre qu'à chaque fois le niveau d'éclairement change, l'algorithme INC suit parfaitement et rapidement le MPP.

➤ **En échelon**

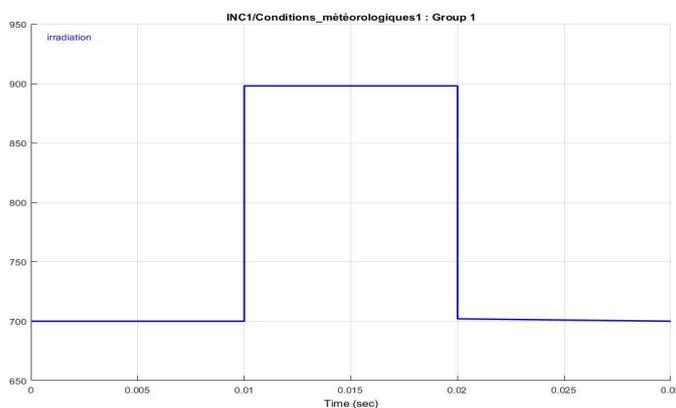


Figure IV.17: Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil rapide)

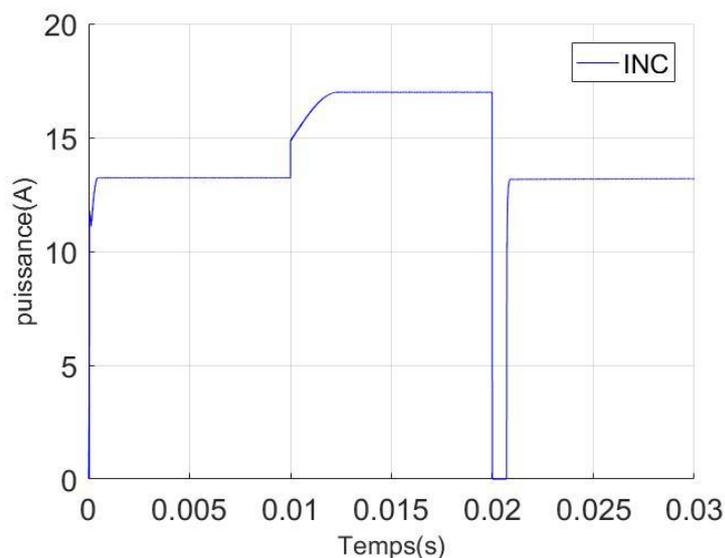


Figure IV.18 : simulation de la méthode INC (profil rapide)

Interprétation des résultats :

La figure (IV.18) montre qu'à chaque fois le niveau d'éclairement change, l'algorithme INC suit rapidement le MPP.

IV.5 Comparaison entre les deux algorithmes

La figure suivante représente les courbes de la puissance extraite par les deux commandes MPPT (P&O et INC) sous une irradiation rapide et variable.

L'excitation externe, i.e. le signal représentant l'irradiation solaire est appliqué (à $t=0s \rightarrow G=700 \text{ W/m}^2$ après à $t=0.01s \rightarrow G=900 \text{ W/m}^2$ et finalement à $t=0.02s \rightarrow G=700 \text{ W/m}^2$), nous avons également pris une condition de température fixe de 25°C .

Les MPP théoriques correspondant à ces conditions de fonctionnement sont aux alentours de **13.4W, 17W, 13.2** respectivement. La courbe de la figure (IV.19) donne le résultat de la poursuite de cette puissance par les deux contrôleurs.

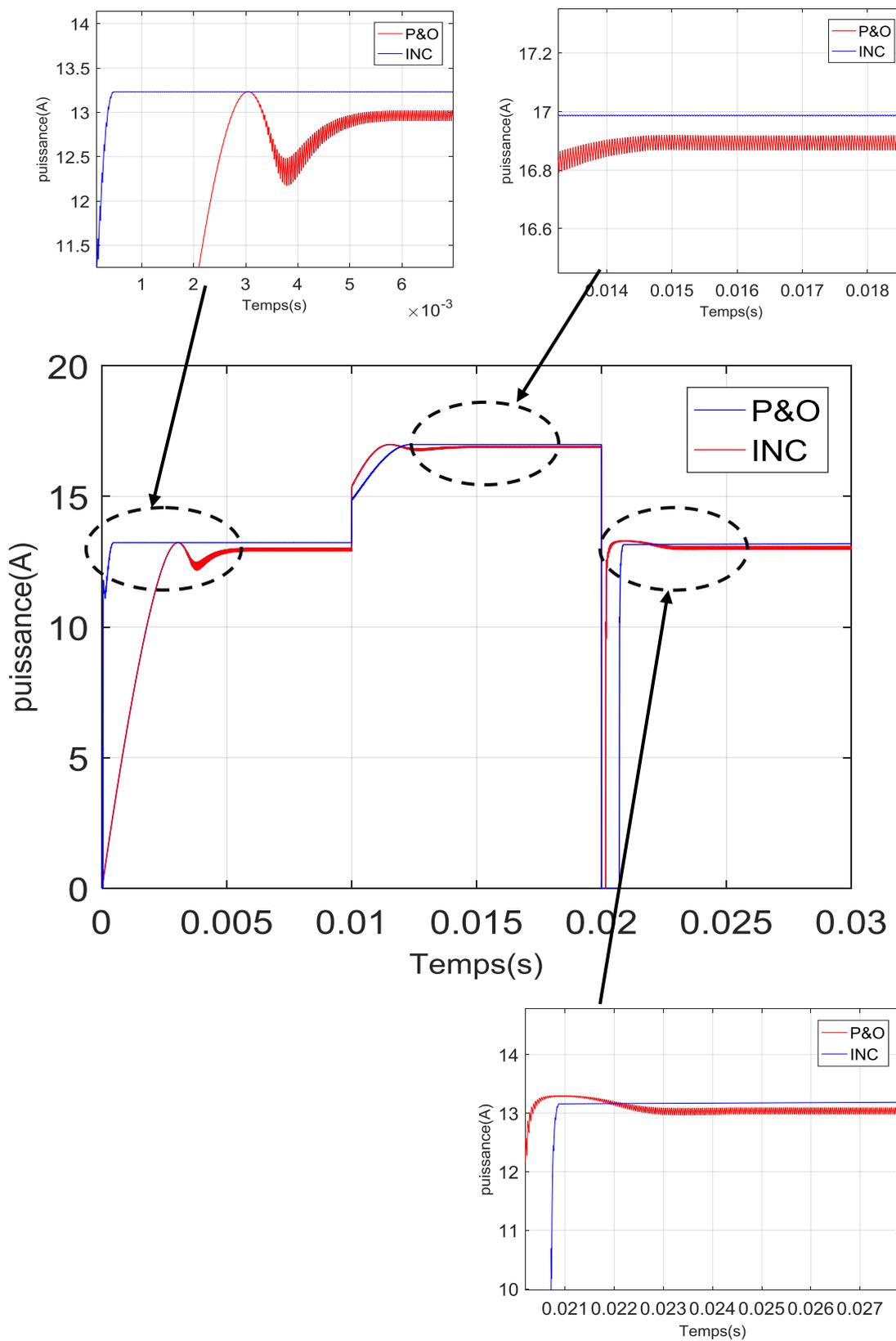


Figure IV.19 :Courbes de comparaison entre P&O et INC.

Interprétation des résultats

En examinant de près ces courbes, il apparaît clair que le suiveur à base du *INC* donne de bons résultats par rapport à *P&O*. le contrôleur *INC* suit rapidement le PPM puisqu'il atteint sa cible après un temps de réponse plus court que le contrôleur à base d'algorithme *P&O*. En outre, la réponse du contrôleur *P&O* présente des oscillations apparentes même après l'établissement du régime permanent contrairement à celle d'*INC*. Et en régime permanent, on remarque que la puissance obtenue par *INC* est toujours plus grande de celle de *P&O* (ça signifie une petite erreur statique en régime permanent), ce qui nous permet de conclure que le suiveur *INC* présente les avantages suivants :

- ✓ Meilleur temps de réponse,
- ✓ Fluctuation en régime permanent réduite,
- ✓ Erreur statique minimale.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenté le principe des deux techniques de commande MPPT, à savoir: *P&O* et *INC*, Puis nous avons fait la modélisation et la simulation de ces différents algorithmes pour des irradiances constantes et variables

L'algorithme *P&O* est un algorithme classique et simple. En générale, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP. Et son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement.

L'algorithme *INC* semble une amélioration de l'algorithme *P&O*. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant, c'est un algorithme plus compliqué que le précédent.

Nous terminerons ce chapitre par une comparaison entre les deux méthodes étudiées, les résultats obtenus nous permettent de conclure que la commande *INC* converge plus rapidement du MPP, la précision s'améliore avec moindres pertes de puissance et présente moins de fluctuations en régime transitoire.

CONCLUSION GENERALE

Aujourd'hui, La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Pour résoudre ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire, qui se trouve dans la plupart des régions du monde. Cependant, cette énergie souffre encore du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de la puissance intermittente à cause de la variation des conditions météorologiques dans certaines régions. Ces problèmes doivent être pris en considération lors de la conception d'un système photovoltaïque. Le présent travail concerne l'étude et la commande d'un système photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome.

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent plus particulièrement la problématique du couplage non parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du GPV à la charge qui est souvent très loin de la puissance maximale du générateur.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'est avéré nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque

Nous avons établis des programmes de simulations sous l'environnement Matlab/Simulink d'un module PV de type ET-M53620WW qui fournit une puissance maximale de 20 W sous des conditions atmosphériques standards. Cette simulation nous a permis d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (i.e., ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques I-V et P-V du module sous différentes configurations.

Pour que le système PV fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation qui fut dans notre étude le convertisseur DC/DC(Boost) associé à un algorithme MPPT bien approprié, les résultats de simulations de ce convertisseur ont montré le bon fonctionnement de ce dernier avec le minimum de pertes.

La dernière partie a été consacrée au problème de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes de conversion PVs. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la

littérature. Mais dans la présente étude, nous avons utilisé deux algorithmes, la méthode perturbation et d'observation (P&O), et méthode incrémentation de la conductance (INC). Nous avons donc étudié, simulé puis comparé ces deux méthodes.

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

A travers l'analyse des résultats de simulation, nous avons pu constater que la méthode P&O présentait des oscillations beaucoup plus importantes autour du MPP et que son algorithme interprète mal tout changement brusque du niveau d'éclairement. La méthode MPPT utilisant l'algorithme INC arrive à joindre rapidement le MPP (meilleur temps de réponse) avec des oscillations insignifiantes sous des conditions atmosphériques constantes et variables

Comme perspectives, plusieurs travaux futurs pourraient être poursuivis à partir de nos résultats. Nous proposons particulièrement :

- La généralisation de l'étude d'optimisation. Il est envisageable d'inclure les batteries dans le système proposé.
- Utiliser des méthodes d'optimisation pour choisir les meilleurs paramètres de contrôle de la méthode INC améliorée (à pas variable)
- Etudier et comparer d'autres contrôleurs MPPT (logique floue, réseaux de neurones..., etc).
- Implémenter ces contrôleurs étudiés sur des cartes électroniques afin de les valider expérimentalement.

Références bibliographiques

- [1] IEA. (2023). *Governments are continuing to push investment into clean energy amid the global energy crisis*. Available: <https://www.iea.org/news/governments-are-continuing-to-push-investment-into-clean-energy-amid-the-global-energy-crisis>
- [2] M. P. Stéphane, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, 20 Janvier 2009.
- [3] M. abdelraouf and R. m. ali, "Optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes," Génie Électrique Université Echahid Hama Lakhder, 2021/2022.
- [4] M. d. l'énergie. (2023). *Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie*.
- [5] A. J. Ångström, *Recherches sur le spectre solaire*: Schultz, 1869.
- [6] K. Mokhtari and Y. Larabi, "Etude et simulation d'un système photovoltaïque. ," Génie électrique, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [7] A. TOULAIT and R. Aili, "Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT," Génie Electrique, Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2014.
- [8] L. BOUCERREDJ, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande mppt," *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism*, vol. 5, pp. 197-205, 2021.
- [9] K. Mertens, *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*: John Wiley & Sons, 2018.
- [10] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque," Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [11] M. Djebbari, "Etude et simulation d'un panneau solaire photovoltaïque raccordé au réseau électrique."
- [12] S. ABOUDA, "CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES: APPLICATION AUX SYSTEMES DE POMPAGE ", DEA – Electrotechnique, Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax 14 avril 2015.
- [13] B. Ammar and M. Choayb, "Comparaison entre différentes techniques de commande MPPT d'un système solaire," Département de Génie Electrotechnique et Automatique, Université Magi 1945 – Gruel, 2020.
- [14] L. Djamel, "Poursuite du Point Maximale d'un SystèmePhotovoltaïque par les Méthodes Intelligentes," DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, UNIVERSITE MOHAMMED OKUDA - MISLAY, juin 2016.
- [15] D. B. RACHID, "Recueil de Travaux Pratiques en Systèmes Photovoltaïques (RTPSP)," ed. Université de Blida 1, janvier 2021.
- [16] W. Benmoussa, S. Amara, and A. Zerga, "Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin," *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07, Tlemcen*, 2007.

Références bibliographiques

- [17] D. Kadidia, "Etude et Simulation d'un Système Photovoltaïque contrôlé par l'algorithme MPPT-Incrémentation de la conductance," GENIE MECANIQUE, UNIVERSITE SAAD DAHLAB, BLIDA_1, 2021.
- [18] Azoui, "cours Systèmes photovoltaïques," in, *Master Energies renouvelables*, ed, 2019.
- [19] M. Amarouayache, "Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque," 2014.
- [20] M. B. BABAAISSA, "etude et simulation d'une commande MPPT," école Nationale Polytechnique, 2013.
- [21] P. A. Rufer, "Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC," école polytechnique fédérale de LAUSANNE.
- [22] M. S. BENSAOUDI and S. E. ARAR, "Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque," Dr Bousmaha Imen Souhila, 2020.
- [23] K. A. TONI, "Conception et intégration d'un convertisseur buck en technologie 28 nm CMOS orientée plateformes mobiles," INSA LYON, 2019.
- [24] M. Adnane, "Contribution A L'amélioration Des Performances De La Commande Mppt D'un Systeme Photovoltaïque En Utilisant Les Techniques De L'intelligence Artificielle Implementees Sur Circuits Numeriques Programmables," Département d'Electronique, UNIVERSITE DE SALAD DAHLEB DE BLIDA, novembre 2012.
- [25] S. Motahhir, A. El Hammoumi, and A. El Ghzizal, "The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm," *Journal of cleaner production*, vol. 246, p. 118983, 2020.
- [26] B. Sana and B. Cherifa, "modélisation et commande flou d'un système photovoltaïque utilisation de NFIS," Département d'électronique, SAAD DAHLAB Blida, 2019/2020.
- [27] G. N. e. M. Abdelkader, "Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque," MEMOIRE DE Master II, Département de Génie Electrique, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi Juin 2017.
- [28] B. Mhenna, "Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque," Mémoire de Fin d'Etudes de master academique, departement d'automatique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Septembre 2018.
- [29] O. Boukli-Hacene, "Conception et realisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique," 2011.
- [30] F. Oussama, "Optimisation de la production énergétique d'une chaîne photovoltaïque," Memoire De Master, Électrotechnique, Annaba- Mokhtar Badji U, Juin 2019.
- [31] M. B. M. Lamine, "Simulation et étude comparative entre la méthode P&O et la méthode Incrémentation de la conductance," département d'Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [32] B. Nassim and B. Smail, "Commande directe par la méthode Incremental Conductance (Inc-Cond) d'un panneau photovoltaïque," Département D'Electrotechnique, Université Modulo Maimer De Tizi-Ouzou, 2018.