



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Automatique
Automatique et informatique industriel

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Ghiloubi Imam Barket

Le : jeudi 24 septembre 2020

Poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système photovoltaïque sous les conditions PSC basée sur l'algorithme PSO

Jury :

M.	Touba Mohamed Mostfa	MCA	Université de Biskra	Président
M.	Saadoun Achour	Pr	Université de Biskra	Examineur
M.	Arif Ali	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2019 - 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Automatique

Option : Automatique et informatique industriel

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système photovoltaïque sous les conditions PSC basée sur l'algorithme PSO

Présenté par :

Ghiloubi Imam Barket

Avis favorable de l'encadreur :

Mr.Arif Ali

Avis favorable du Président du Jury

Mr.Touba Mohamed Mostfa

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Automatique

Option : Automatique et informatique industriel

Thème :

Poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système photovoltaïque sous les conditions PSC basée sur l'algorithme PSO

Proposé et dirigé par : Dr.Arif Ali

Résumé :

Sous un niveau d'irradiance solaire non uniforme, plusieurs points de puissance maximale sont apparus mais il n'existe qu'un seul point de puissance maximale globale, ce qui conduit à un problème d'optimisation. Ce mémoire présente un algorithme de suivi du point de puissance maximale d'un champ photovoltaïque sous les conditions d'ombrage partiel(PSC), basé sur l'optimisation par l'essaim de particules. Les résultats de simulation montrent que la technique MPPT appliquée peut atteindre le point de puissance maximale globale et ne pas stagner au premier pic de puissance même s'il est un point de puissance maximale local, le résultat qui ne peut être pas obtenu à travers les techniques MPPT classiques comme Perturbation et Observation (P&O) ou Incrémentation Décrémentation (IC).

Mots clés : Photovoltaïque, MPPT, PSO, Conditions d' Ombrage partiel.

Remerciement

Remerciement

Remerciement

Je remercie tout d'abord Allah le tout miséricordieux le très miséricordieux, "Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah ne nous avait pas guidés". **AL-A'RAF -43-**

Tous mes appréciations et mon respect et remercie sont destinés à mon encadreur "Dr.Arif Ali" pour sa patience et sa sincérité et ses efforts durant le travail présenté et durant tout mon cycle dans le département de génie électrique.

Je voudrais remercier les membres du jury Dr. Touba Mostafa Mohamed et Pr.Saadoun Achour qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec attention mon travail.

Je remercie particulièrement "Dr.Guettaf Abderrazek" qui m'a aidé pour faire réussir ce mémoire et tous les enseignants de la filière d'automatique de l'université Mohamed Khider Biskra, pour ses informations précieuses et ses explications.

Merci beaucoup à mes chers parents qui ont privés de plusieurs choses pour me faire réussir, et merci à mes frères et mes sœurs qui attendent avec passion la première soutenance dans la famille.

Je remercie tout mes amis dans le groupe d'automatique pour le cycle d'étude inoubliable à l'université "Gaffa, Oufa, Youssef, Oussama, Imad, Selma, Amel, zain, Eddarda, Saïd, Nessrine, Sami, Hamid ", et "Rechachi Wissen" pour son encouragement durant le travail ... et les autres collègues du département de génie électrique chacun à son nom , et je remercie infiniment "Gharsa Oumaima" qui m'a aidé sincèrement à s'intégrer rapidement aux études du premier semestre dans un temps critique suite à mon absence.

Je dois remercier les entreprises : Google pour son très vaste espace de recherche, "Microsoft" pour le logiciel Microsoft office (Word/Excel/PowerPoint) et "Mathworks" surtout pour son logiciel de programmation et simulation "Matlab/Simulink 2017", car elles avaient le rôle principal pour faire réussir ce travail.

Résumé

Résumé

Sous un niveau d'irradiance solaire non uniforme, plusieurs points de puissance maximale sont apparus mais il n'existe qu'un seul point de puissance maximale globale, ce qui conduit à un problème d'optimisation. Ce mémoire présente un algorithme de suivi du point de puissance maximale d'un champ photovoltaïque sous les conditions d'ombrage partiel (PSC), basé sur l'optimisation par l'essaim de particules. Les résultats de simulation montrent que la technique MPPT appliquée peut atteindre le point de puissance maximale globale et ne pas stagner au premier pic de puissance même s'il est un point de puissance maximale local, le résultat qui ne peut être obtenu à travers les techniques MPPT classiques comme Perturbation et Observation (P&O) ou Incrémentation Décrémentation (IC).

Mots clés : Photovoltaïque, MPPT, PSO, Conditions d' Ombrage partiel.

ملخص

تحت مستوى غير متعادل من الإضاءة تظهر العديد من نقاط الاستطاعة القصوى، واحدة فقط تمثل نقطة الاستطاعة القصوى الكلية، وهذا ما يكون مشكل تحسين. تعرض هذه المذكرة خوارزمية تتبع نقطة الاستطاعة الكلية لحقل كهروضوئي تحت شروط تضليل جزئي، تعتمد على التحسين بحركة الجزيئات. نتائج المحاكاة تبين أن تقنية الـ MPPT المطبقة تستطيع الوصول إلى نقطة الاستطاعة الكلية و عدم التوقف عند أول قمة للاستطاعة حتى وإن كانت محلية، وهي النتيجة التي لا يمكن أن نحصل عليها عن طريق تقنيات الـ MPPT الكلاسيكية مثل الاضطراب و المراقبة أو الزيادة و التناقص.

الكلمات المفتاحية: كهروضوئي، تتبع نقطة الاستطاعة القصوى، التحسين بحركة الجزيئات، شروط التضليل الجزئي

Abstract

Under a non-uniform solar irradiance level, several points of maximum power have appeared but there is only one point of overall maximum power, which leads to an optimization problem. This thesis presents an algorithm for tracking the maximum power point of a photovoltaic field under partial shade conditions (PSC), based on optimization by particle swarms. The simulation results show that the applied MPPT technique can reach the overall maximum power point and not stagnate at the first power peak even though it is a local maximum power point, the result which cannot be achieved through the classic MPPT techniques such as Perturb and Observ (P&O) or Increment Decrement (IC).

Keywords : photovoltaic, MPPT, PSO, Partial Shading Conditions.

Table des matières

Table des matières

Remerciement	
Résumé	
Liste des acronymes	
Liste des symboles	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre1 : L'énergie photovoltaïque	3
1.1 Introduction	3
1.2 L'énergie photovoltaïque.....	3
1.2.1 Définition	3
1.2.2 Rayonnement solaire.....	3
1.2.3 Irradiation ou irradiancia ?.....	4
1.2.4 L'effet PV	4
1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie PV	5
1.3.1 Avantages	5
1.3.2 Inconvénients	6
1.4 Les générations des cellules PV	6
1.4.1 Première génération	6
1.4.2 Deuxième génération	7
1.4.3 Troisième génération	7
1.5 Association des cellules photovoltaïques	8
1.5.1 Association série des cellules.....	8
1.5.2 Association parallèle des cellules	8
1.5.3 Panneau et champ photovoltaïque	9
1.6 Différentes architectures d'un système photovoltaïque	10
1.6.1 Système PV autonome	10
1.6.2 Système PV couplé au réseau	11
1.6.3 Système hybride contenant l'énergie photovoltaïque	12
1.7 Les différentes applications de l'énergie photovoltaïque	12
1.8 Conclusion	13
Chapitre 2 : Modélisation et simulation du système photovoltaïque	14
2.1 Introduction	14

Table des matières

2.2 Modélisation de cellule photovoltaïque	14
2.3 Paramètres d'une cellule PV	16
2.3.1 Courant de court circuit (I_{cc})	16
2.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{co})	16
2.3.3 Facteur de forme (FF)	16
2.3.4 Rendement de conversion nm	16
2.4 Influence des paramètres internes sur le module photovoltaïque	17
2.4.1 Influence de la résistance série R_s	17
2.4.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh}	18
2.5 Influence des paramètres externes sur le module photovoltaïque	19
2.5.1 Influence d'irradiance G	19
2.5.2 Influence de la température T	20
2.6 Les convertisseurs (DC/DC)	20
2.6.1 Convertisseur DC/DC dévolteur(Buck)	20
2.6.2 Convertisseur DC/DC survolteur(Boost)	21
2.6.3 Convertisseur DC/DC dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	21
2.6.4 Fonctionnement de l'hacheur Boost	21
2.7 Conclusion	24
Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO.....	25
3.1 Introduction :	25
3.2 Poursuite du point de puissance maximale MPPT	25
3.3 Champ PV sous PSC	27
3.3.1 Les conditions d'ombrage partiel (PSC)	27
3.4 La méthode d'optimisation par l'essai particulaire (PSO)	28
3.4.1 Description et historique de la méthode PSO	28
3.4.2 Principe de la méthode PSO	28
3.4.3 Application de la méthode PSO sur l'MPPT	30
3.5 Schéma d'un système photovoltaïque sous PSC dont le MPP est suivi à base de l'algorithme PSO	32
3.6 Conclusion	33
Chapitre 4 : Résultats et discussion	34
4.1 Introduction	34
4.2 La caractéristique P=f(V) du champ PV simulé	34

Table des matières

4.2.1 La caractéristique puissance en fonction de tension d'un champ PV sous une irradiance uniforme	34
4.2.2 La caractéristique puissance en fonction de tension d'un champ PV sous les conditions PSC	35
4.3 Simulation de l'hacheur boost	36
4.4 Poursuite du point MPP par la méthode MPPT basée sur PSO	38
4.5 Conclusion	40
Conclusion générale	41
Bibliographie.....	43

Liste des acronymes

Liste des acronymes

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

FhG-ISE: Fraunhofer-Institut für Solare Energie système.

NREL: National Renewable Energy Laboratory.

AIST: Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

Ge : Germanium.

Si : Silicium.

GaAs : Arséniure de Gallium.

InP : phosphore d'indium.

CdS : sulfure de cadmium.

CdTe : Tellurure de cadmium.

E_v : bande de valence.

E_c : bande de conduction.

E_g : énergie de gap.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPP : Maximum Power Point (Point de puissance maximale).

MPPT : Maximum Power Point Tracking (Poursuite du point de puissance maximale).

PSC : Partial Shading Conditions.

AC : Alternating Current (Courant alternatif).

DC : Direct Current (Courant continu).

IC : Incremental Conductance.

FLC : Fuzzy Logic Control.

GA : Genetic Algorithm.

PSO : Particle Swarm Optimization.

Liste des symboles

Liste des symboles

π : constant d'Archimède.

N : nord.

S : sud.

c : célérité de lumière.

γ : fréquence.

Hz : hertz.

h : constante du Planck.

m : Mètre.

E : Energie.

J/s : Joule par second.

m/s : mètre par second.

λ : lambda, longueur d'onde.

R : rayon.

ψ : flux lumineux

\emptyset : flux incident.

Km : kilomètre.

Km/s : kilomètre par second.

cm² : centimètre au carré.

μm : micromètre.

I : Courant

V : tension.

P : puissance.

A : ampère.

v : volt.

W : watt.

Liste des symboles

Ω : Ohm.

W/m^2 : watt sur mètre au carré.

KW/m^2 : kilowatt sur mètre au carré.

KWh/m^2 : Kilowattheure sur mètre au carré.

T : Température.

T_c : Température de la jonction.

C° : degré Celsius.

K° : degré Kelvin.

K : Constante de Boltzmann.

J/K : Joule sur kelvin.

q : Charge d'électron.

C : Coulomb.

n : Facteur d'idéalité de photopile.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{ph} : Photo-courant.

I_{pv} : Courant de cellule.

I_d : Courant de diode

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

I_{sh} : Courant de la résistance shunt.

V_t : Tension thermique de la diode.

FF : Facteur de forme.

S : Surface de cellule.

V_i : Tension d'entrée.

V_0 : Tension de sortie.

Liste des symboles

C_1 : Capacité d'entrée.

C_2 : Capacité de sortie.

i_i : Courant d'entrée.

I_0 : Courant de sortie.

α : Rapport cyclique.

C : Capacité

L : Inductance.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Premier Chapitre

Tableau 1. 1 L'énergie de gap des différents semi-conducteurs à 26.85 C° (300K)[DOU18]... 5	5
Tableau 1. 2 Première génération des cellules PV [MEK18]..... 6	6
Tableau 1. 3 Deuxième génération des cellules PV [MEK18] 7	7
Tableau 1. 4 Troisième génération des cellules PV [MEK18]..... 7	7

Deuxième Chapitre

Tableau 2. 1 Paramètres du module photovoltaïque simulé..... 17	17
---	----

Quatrième Chapitre

Tableau 4. 1 Caractéristiques du champ PV simulé..... 35	35
--	----

Liste des figures

Liste des figures

Liste des figures

Premier Chapitre

Figure 1- 1 Densité de la puissance d'irradiance [RAY]	4
Figure 1- 2 Principe de l'effet photovoltaïque [THE & TOM19]	5
Figure 1- 3 (a) Silicium mono-cristallin / (b) : Silicium multi-cristallins [livre]	6
Figure 1- 4 Caractéristique (puissance en fonction de tension) pour des cellules montées en série	8
Figure 1- 5 Caractéristique (courant en fonction tension) pour des cellules montées en série .	8
Figure 1- 6 Caractéristique (puissance en fonction de tension) pour des cellules montées en parallèle	9
Figure 1- 7 Caractéristique (courant en fonction de tension) pour des cellules montées en parallèle	9
Figure 1- 8 Cellule PV, Module PV et champ PV [KIH19]	10
Figure 1- 9 Association des modules photovoltaïques	10
Figure 1- 10 Système photovoltaïque autonome [ELJ15].....	11
Figure 1- 11 Système photovoltaïque couplé au réseau [ELJ15].....	11
Figure 1- 12 Système électrique hybride.....	12
Figure 1- 13 Différentes applications de l'énergie photovoltaïque.....	12

Deuxième Chapitre

Figure 2 - 1 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	14
Figure 2 - 2 Influence de variation de la résistance série R_s sur la caractéristique $I=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000W/m^2$ et $25 C^\circ$)	17
Figure 2 - 3 Influence de variation de la résistance série R_s sur la caractéristique $P=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000W/m^2$ et $25 C^\circ$)	18
Figure 2 - 4 Influence de variation de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique $I=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000W/m^2$ et $25 C^\circ$)	18
Figure 2 - 5 Influence de variation de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique $P=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000W/m^2$ et $25 C^\circ$)	18

Liste des figures

Figure 2 - 6 Courant en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes irradiances (en W/m^2).....	19
Figure 2 - 7 Puissance en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes irradiances (en W/m^2).....	19
Figure 2 - 8 Courant en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes températures (en C°).....	20
Figure 2 - 9 Puissance en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes températures (en C°).....	20
Figure 2 - 10 Schéma électrique de l'hacheur Buck	20
Figure 2 - 11 Schéma électrique de l'hacheur Boost	21
Figure 2 - 12 Schéma électrique de l'hacheur Buck-Boost	21
Figure 2 - 13 Circuit équivalent de l'hacheur Boost : k fermé (a) , K ouvert (b)	22
Figure 2 - 14 Chronogramme de fonctionnement de l'hacheur Boost.....	23

Troisième Chapitre

Figure 3- 1 Programme de détermination de l'MPP	25
Figure 3- 2 Le point MPP et la tension $V_{optimale}$ dans la caractéristique $P=f(V)$	26
Figure 3- 3 Un système PV dont le fonctionnement est gardé dans le point MPP	26
Figure 3- 4 Champ photovoltaïque sous les conditions PSC	27
Figure 3- 5 Le rôle de la diode anti-retour	28
Figure 3- 6 Principe du déplacement des particules dans l'espace de recherche (exemple des oiseaux)	29
Figure 3- 7 Organigramme de la méthode PSO pour réaliser l'MPPT	31
Figure 3- 8 Schéma de la méthode MPPT basant sur l'algorithme PSO sous MATLAB/SIMULINK	32
Figure 3- 9 Composition du block "Champ PV" présenté sur la	33

Quatrième Chapitre

Figure 4- 1 La caractéristique $P=f(V)$ pour un champ PV sous différentes irradiances uniformes.....	34
Figure 4- 2 La caractéristique $P=f(V)$ pour un champ PV sous différentes conditions d'ombrage partiel (PSC)s	35

Liste des figures

Figure 4- 3 Schéma de l'hacheur éleveur (boost) sous Matlab/Simulink	36
Figure 4- 4 Tensions d'entrée et de sortie en fonction du temps	37
Figure 4- 5 Courants d'entrée et courant de sortie en fonction du temps	37
Figure 4- 6 Quelques étapes de procédure de la technique MPPT basant sur PSO	39

Introduction générale

Introduction générale

La pollution, la nuisance, le monopole économique et la technologie très compliquée de la production d'énergie électrique basée sur les sources fossiles (gaz, charbon, pétrole), en outre, les gisements limités de ces produit et la difficulté et le coût de leur extraction, pousse à chercher la source d'électricité productrice remplaçante .

Les chercheurs ont pu développer des techniques pour convertir des énergies de nature renouvelables et propre comme celle basant sur la puissance du vent (énergie éolienne), sur la chaleur de terre (énergie géothermique), sur la puissance d'eau (l'énergie hydraulique réalisée par les barrages d'eau par exemple) et l'énergie solaire divisée en énergie solaire thermique et solaire photovoltaïque sur laquelle notre étude se base.

La technique utilisée pour convertir l'énergie photovoltaïque en énergie électrique c'est bien la cellule photovoltaïque basant sur l'effet photovoltaïque réalisé lorsque les photons de lumière attaquent les électrons libres d'un matériau semi conducteur, l'opération qui excite le ces électrons à se déplacer ce provoque un mouvement successif de ces électrons, c'est le courant électrique produit. On a donc une source d'électricité propre (sans pollution et émissions de gaz), c'est l'avantage des types des énergies renouvelables (éolien, hydraulique, photovoltaïque...) par rapport aux énergies basant sur les sources fossiles et silencieuse (sans nuisance d'une turbine) par rapport aux autres énergies renouvelable (éolienne, géothermique...) ou on trouve des turbines pour faire la rotation. Ainsi, la conversion photovoltaïque fournit une tension continue ce qui permet de stocker d'électricité produite sans utiliser un convertisseur AC/DC.

Plusieurs cellules PV forment lorsqu'elles soient rassemblées un module photovoltaïque, de même, on installe plusieurs modules PV en (série/parallèle) pour augmenter la puissance générée, on parle donc d'un champ photovoltaïque (central PV). Cette puissance se varie selon l'éclairage du lieu, c'est-à-dire on va trouver un problème lorsque le lieu n'est pas complètement éclairé ceux sont les conditions d'ombrage partiel(PSC) ce qui provoque le risque du point chaud (Hot Spot) dans les modules PVs partiellement ombrés.

A partir d'une source PV, on doit avoir la puissance maximale peut être fournie à chaque instant, c'est pour cela, on présente dans ce mémoire une technique MPPT base sur l'algorithme PSO cherche le point de puissance maximale, c'est un problème d'optimisation un peu critique car il n' y aura pas un seul point de puissance maximale à chercher, comme

dans un système PV sous une irradiance uniforme, mais il y aura plusieurs pic de puissance on les remarquera dans la caractéristique puissance en fonction de tension à cause des conditions PSC dans notre travail divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre définit et explique le principe de conversion photovoltaïque, les avantages et les inconvénients de ce type d'énergie, puis les différentes architectures et applications d'un système PV ainsi que l'intégration des cellules PV pour composer une source photovoltaïque plus puissante (Cellule PV/Module PV/Champ PV).

Le deuxième chapitre présente la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque et ces paramètres principaux puis la simulation du module PV et l'étude d'influence des paramètres internes et externes sur ces caractéristiques $P=f(V)$ et $I=f(V)$ arrivant au convertisseur DC/DC utilisé dans ce travail.

Le troisième chapitre explique la technique de recherche du point de puissance maximale (Maximal Power Point Tracking « MPPT ») et l'algorithme PSO, puis il présente à travers les équations et un organigramme le principe de fonctionnement de la technique MPPT basant sur cet algorithme. Après, il y aura une explication sur la sécurité d'un système PV et le phénomène d'ombrage partiel (PSC) sous laquelle on pose la source PV du notre système photovoltaïque contrôlé par la technique MPPT.

Dans le dernier chapitre, on affiche les différents résultats commençant par la caractéristique puissance en fonction de tension $P=f(V)$ d'un champ PV sous une irradiance uniforme puis sous les conditions d'ombrage partiel (PSC), après on passe vers les résultats de simulation de l'hacheur boost exprimés par le courant d'entrée et de sortie et la tension d'entrée et de sortie. Enfin, on affiche la caractéristique $P=f(V)$ sous les conditions PSC d'un champ PV contrôlé par la technique MPPT basée sur l'algorithme PSO en présentant quelques étapes de suivre du point de puissance maximale globale. On simule le module PV dans le deuxième chapitre et les résultats du dernier chapitre ainsi que l'application de la technique MPPT basée sur le PSO à travers le logiciel Matlab/Simulink 2017 installé sur un ordinateur équipé par un microprocesseur ($\mu.p$) à 2.13 GHz et une mémoire vivante (RAM) de 4Go.

Finalement, On terminera ce mémoire par une conclusion générale, rassemble les idées nécessaires extraits à partir de ce travail, notre perspective dans ce type d'optimisation et tout ce qu'on peut améliorer dans ce domaine.

*Chapitre 1 : L'énergie
photovoltaïque*

Chapitre1 : L'énergie photovoltaïque

1.1 Introduction :

La production d'électricité par les sources d'énergie conventionnelles (charbon, pétrole, gaz,...) ne présente pas seulement un grand danger pour l'environnement, mais elle dépend aussi de la durée d'exploitation limitée de ces sources (non renouvelables). Alors, il est nécessaire de s'orienter vers d'autres énergies renouvelables, comme l'énergie solaire. Dans ce chapitre on va définir l'une des formes de l'énergie solaire appelée photovoltaïque, son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients ainsi que les types des cellules PV et la composition du panneau PV puis les différentes applications possibles d'un système photovoltaïque.

1.2 L'énergie photovoltaïque :

1.2.1 Définition :

Le mot « photovoltaïque » (PV) est composé de deux mots ; « photo » qui veut dire lumière et « voltaïque » (d'après le nom du physicien italien Alessandro Volta (1745-1825) qui a découvert la première batterie électrochimique) qui veut dire électricité. Donc la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil. [MEK18]

1.2.2 Rayonnement solaire :

Le soleil émet de l'énergie dans toutes les directions, et la Terre intercepte et reçoit une partie de cette énergie. Le flux de puissance atteignant le sommet de l'atmosphère de la Terre est d'environ 1400 Watts / m². L'atmosphère relativement dense de la Terre filtre environ 400 W/m² (Figure 1-1). Les rayonnements émis sont de type électromagnétique. Ils constituent un spectre continu allant des ultra-violets à l'infrarouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Les rayons solaires prennent 8.33 minutes pour arriver à la terre puisque ils se propagent à une vitesse de 3×10^8 km/s et la distance entre la terre et le soleil 150. 10⁶ km. [ELJ15]

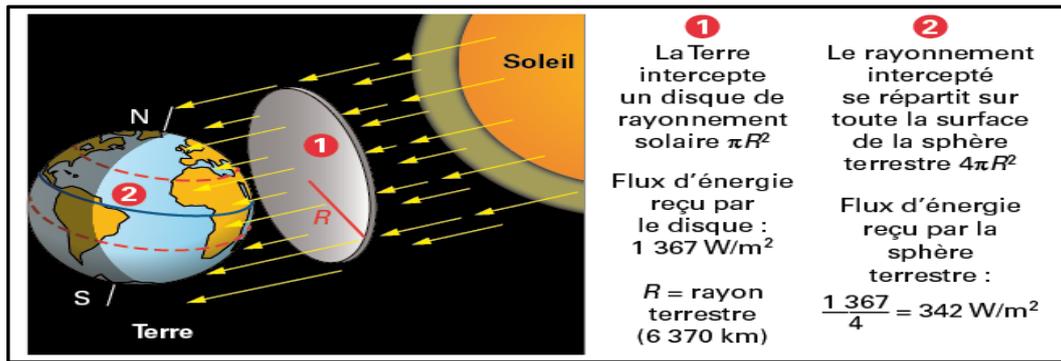


Figure 1- 1 Densité de la puissance d'irradiance [RAY]

1.2.3 Irradiation ou irradiances ?

L'irradiance est la mesure de la densité de puissance de la lumière du soleil en W/m^2 . Elle est ainsi, une quantité instantanée. La constante solaire correspond à l'irradiance venant du soleil et reçue par la terre au-dessus de l'atmosphère.

L'irradiation est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, en kWh/m^2 , elle est souvent exprimée en «heures de puissance crête», qui correspond à la durée en heures, à un niveau d'irradiance constant de $1\ \text{kW/m}^2$. [ATT17]

1.2.4 L'effet PV :

Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation (1.1). [ATT17]

Le phénomène de conversion photovoltaïque est dû à la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière. 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. (Figure1-2) Donc, le principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie appelée énergie de photon comme le montre l'équation : [BOU18]

$$E_{ph} = h \cdot \gamma = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec :

c : la célérité de lumière = $3 \cdot 10^8\ \text{m/s}$

λ : la longueur d'onde en [m]

h : la constante de Planck = $6,624 \cdot 10^{-34}\ \text{J.s}$

γ : Fréquence en [Hz]

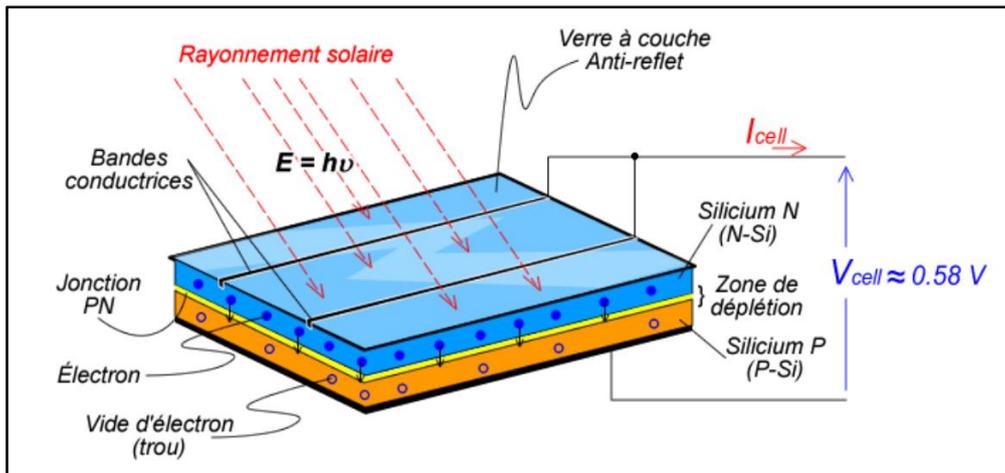


Figure 1- 2 Principe de l'effet photovoltaïque [THE & TOM19]

Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap $E_g = E_c - E_v$ du semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence E_v à la bande de conduction E_c en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement au passage des porteurs majoritaires. Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence ont tendance à être " arrachés / décrochés: si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. [BOU18]

Tableau 1. 1 L'énergie de gap des différents semi-conducteurs à 26.85 C° (300K)[DOU18]

	Ge	Si	GaAs	InP	CdS	CdTe
$E_g(\text{eV})$	0.67	1.12	1.43	1.29	2.42	1.44

1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie PV :

1.3.1 Avantages :

- Energie primaire gratuite et renouvelable (rayonnement du soleil).

- Peu d'entretien, facilité et souplesse d'installation.
- Exploitation silencieuse et propre (sans émission de gaz à effet de serre).
- Alimentation des charges isolés comme les satellites les avions et les sites loins du réseau électrique.

1.3.2 Inconvénients :

- Le coût élevé et le faible rendement.
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques. [MEK18]
- La nécessité d'espace (On ne peut pas installer les panneaux l'un sur l'autre).
- L'intermittence dans la production selon l'intensité du rayonnement solaire.

1.4 Les générations des cellules PV :

1.4.1 Première génération :

Elle concerne les cellules solaires classiques du silicium massif (c-Si) de substrat à épaisseur supérieure à 100 μm . Pour ses deux types mono-cristallin et multi-cristallin, la technologie de cette génération est mature et bien maîtrisée. Elle présente une production mondiale d'environ 84 % du marché PV. Son rendement est entre (15-26) %. [MEK18]

Tableau 1. 2 Première génération des cellules PV [MEK18]

Cellule solaire	Surface (cm^2)	Rendement (%)	Centre de test (date)
Silicium mono cristallin	180.43	26.3 ± 0.5	FhG-ISEa (07/2016)
Silicium multi cristallin	242.74	21.3 ± 0.4	FhG-ISE (11/2015)

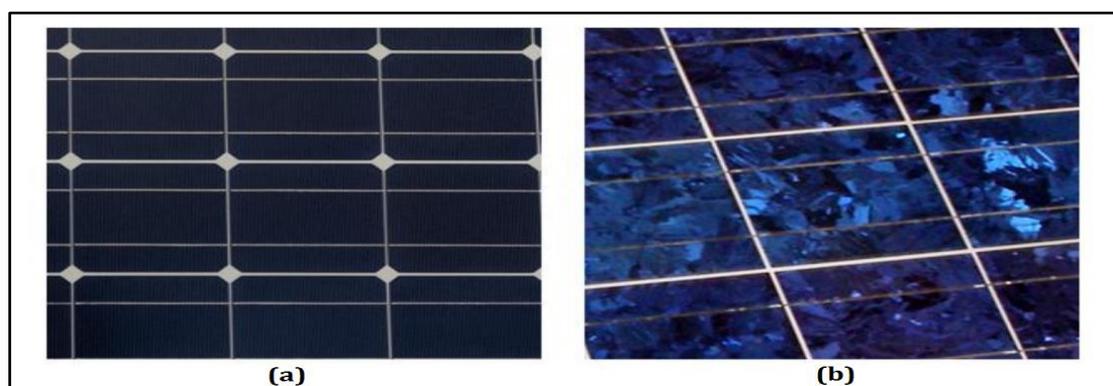


Figure 1- 3 (a) Silicium mono-cristallin / (b) : Silicium multi-cristallins [livre]

1.4.2 Deuxième génération :

Elle concerne les cellules solaires à couches minces d'épaisseur inférieure à 50 μm utilisant le silicium amorphe ou des matériaux de composés comme l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), le di-séléniure de cuivre et d'indium (CuInSe_2) et le dioxyde de titane (TiO_2). Il est possible de réduire les coûts de production de ces types de cellules solaires par rapport à la première génération. De plus, elles sont flexibles et leur utilisation est plus variée. Cependant, Les étapes de production demandent plus d'énergie car on utilise des procédés sous vide et des traitements à haute température. [MEK18]

Tableau 1. 3 Deuxième génération des cellules PV [MEK18]

Cellule solaire	Surface (cm^2)	Rendement (%)	Centre de test (date)
GaAs	0.9927	28.8 ± 0.9	NREL (05/2012)
CIGS	0.9927	21.0 ± 0.6	FhG-ISE (04/2014)
CdTe	1.0623	21.0 ± 0.4	Newport (08/2014)
Silicium amorphe	1.001	10.2 ± 0.3	AIST (07/2014)

1.4.3 Troisième génération :

Actuellement, il y a beaucoup de recherche en cours dans le photovoltaïque pour des types de cellules qui peuvent dépasser le rendement de 20%, ce qu'on appelle les cellules solaires de 3^{ème} génération. Cette génération est basée sur la variété de nouveaux matériaux en dehors de silicium, y compris des nanotubes, les cellules à concentration, des fils de silicium, des encres solaires en utilisant des technologies de presse d'impression classiques, des colorants organiques et des polymères. À l'heure actuelle, la plupart des travaux sur les cellules solaires de 3^{ème} génération est réalisée en laboratoire, et en cours d'élaboration par les nouvelles entreprises car le coût de production reste élevé. [MEK18]

Tableau 1. 4 Troisième génération des cellules PV [MEK18]

Cellule solaire	Surface (cm^2)	Rendement (%)	Centre de test (date)
Colorante (Dye-sensitised)	1.005	11.9 ± 0.4	AIST (09/2012)
Organique	0.992	11.2 ± 0.3	AIST (10/2015)
InGaP/GaAs/InGaAs (multijonction)	1.047	37.9 ± 1.2	AIST (02/2013)
Perovskite/Si (monolithique)	0.990	23.6 ± 0.6	NREL (08/2016)
GaInP/GaAs;GaInAsP/GaInAs(à concentration)	0.0520	46.0 ± 2.2	AIST (10/2014)

1.5 Association des cellules photovoltaïques

1.5.1 Association série des cellules

On a utilisé le logiciel MATLAB 2017 pour simuler les deux caractéristiques $P=f(V)$ et $I=f(V)$ de l'énergie électrique produite par l'association des cellules PV en série.

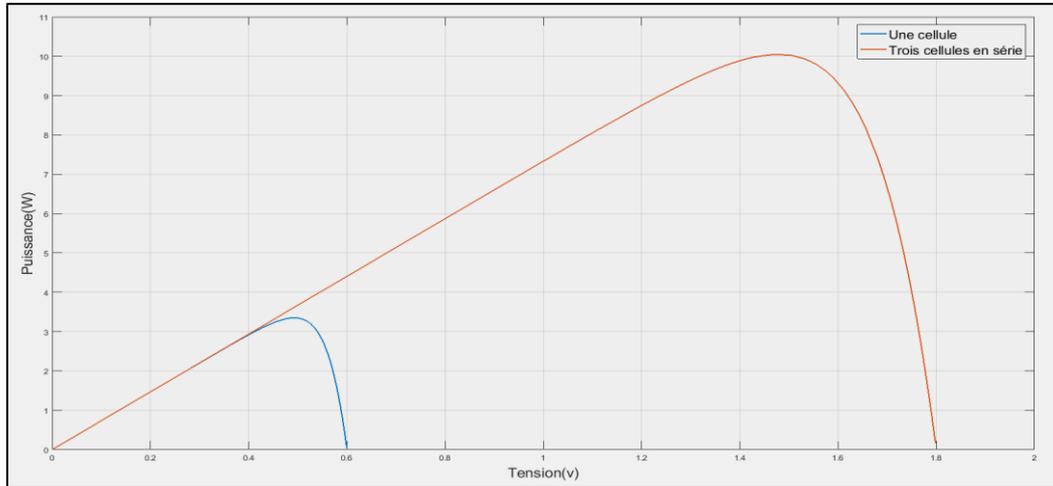


Figure 1- 4 Caractéristique (puissance en fonction de tension) pour des cellules montées en série

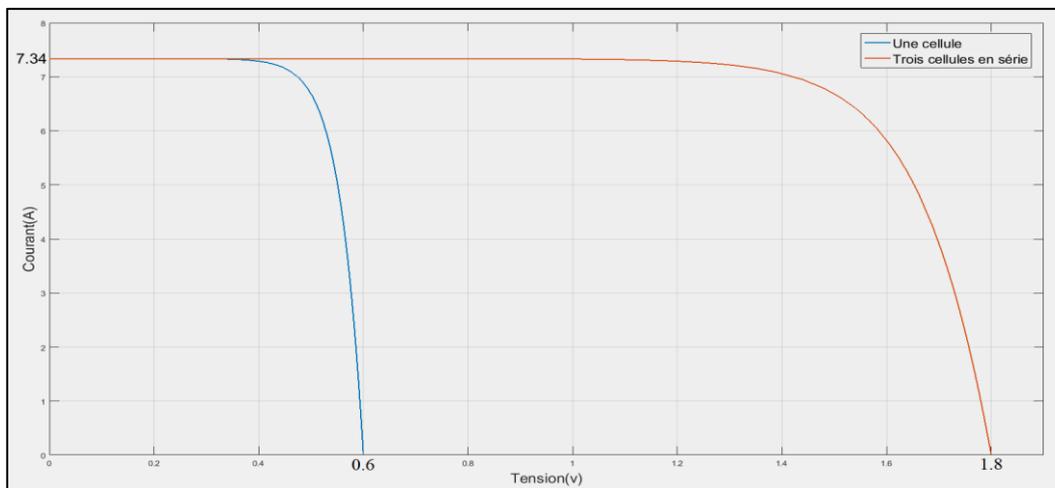


Figure 1- 5 Caractéristique (courant en fonction tension) pour des cellules montées en série

Ce type d'association augmente la puissance fournie (Figure1-4) par l'augmentation de la tension tout en gardant le même courant du montage obtenu (Figure1-5).

1.5.2 Association parallèle des cellules

On a simulé les deux caractéristiques $P=f(V)$ et $I=f(V)$ de l'énergie électrique produite mais cette fois par l'association des cellules PV en parallèle.

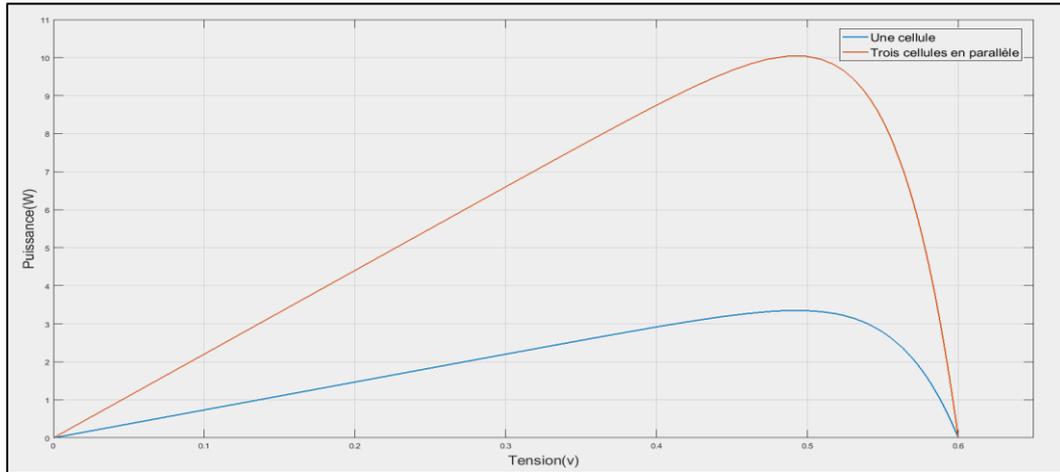


Figure 1- 6 Caractéristique (puissance en fonction de tension) pour des cellules montées en parallèle

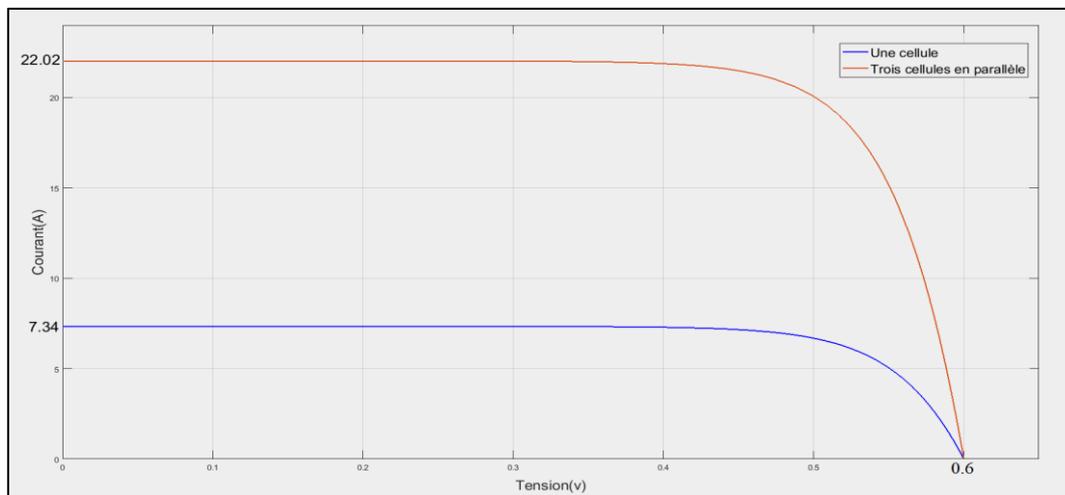


Figure 1- 7 Caractéristique (courant en fonction de tension) pour des cellules montées en parallèle

L'association des cellules PV en parallèle augmente la puissance fournie (Figure 1-6) par l'augmentation du courant tout en gardant la même tension du montage obtenu (Figure 1-7).

1.5.3 Panneau et champ photovoltaïque

Un panneau ou un module photovoltaïque est obtenu par le montage d'un nombre des cellules photovoltaïques bien déterminé, il produit une puissance électrique à une tension continue, dépend du nombre des cellules connectés entre eux.

La connexion des plusieurs modules (panneaux) photovoltaïques, s'appelle le champ photovoltaïque et cela pour obtenir une puissance plus élevée (Figure1-8)



Figure 1- 8 Cellule PV, Module PV et champ PV [KIH19]

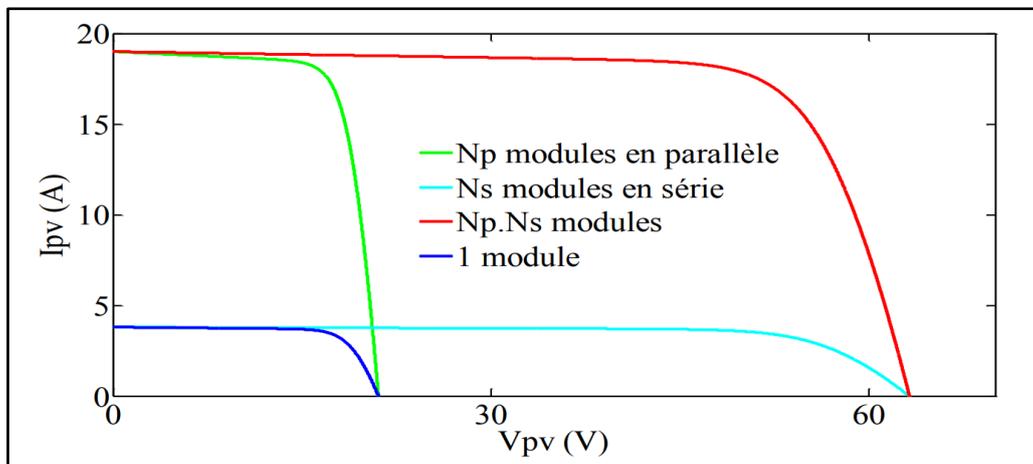


Figure 1- 9 Association des modules photovoltaïques

La figure (1-9) montre la variation de tension et du courant fournis par un champ photovoltaïque (appelé aussi GPV), selon le nombre de ses modules et la manière d'installation (série, parallèle ou série-parallèle), et alors la variation de puissance qui peut être calculé par :

$$P=V \times I \quad (2.1)$$

1.6 Différentes architectures d'un système photovoltaïque:

1.6.1 Système PV autonome :

Il contient une source photovoltaïque (un ou plusieurs panneaux connectés entre eux), fournit une puissance électrique de tension continue réglée par un régulateur de charge qui l'adapte avec la tension nécessaire pour charger le banc des batteries.

La tension de sortie des batteries est convertie en alternatif par un convertisseur statique (onduleur) pour être utilisable par les charges installées (ventilateur, ordinateur, lampes ...). (Figure1-10)

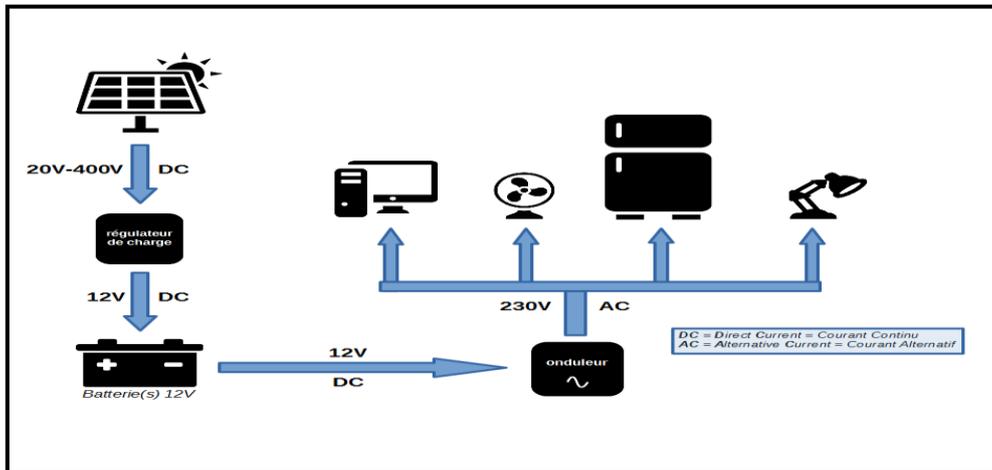


Figure 1- 10 Système photovoltaïque autonome [ELJ15]

1.6.2 Système PV couplé au réseau :

Ce type des systèmes photovoltaïques contient une source photovoltaïque dont la tension continue produite est convertie en tension alternative à travers un convertisseur statique (onduleur) pour être intégrable au réseau électrique.

Le système PV couplé au réseau doit être équipé par deux compteurs, l'un pour compter l'énergie fournie par l'utilisateur (la source photovoltaïque) et envoyée vers le réseau, et l'autre pour compter l'énergie fournie par le réseau électrique et consommée par l'utilisateur. (Figure 1-11)

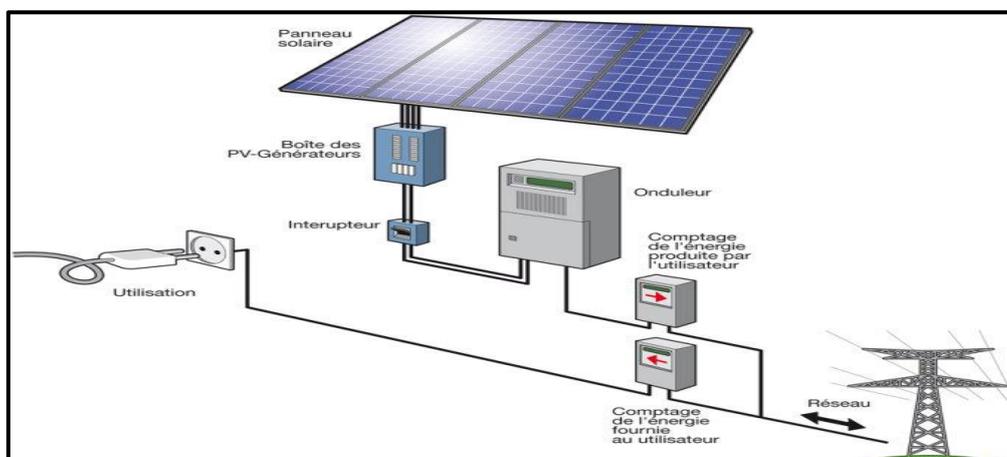


Figure 1- 11 Système photovoltaïque couplé au réseau [ELJ15]

1.6.3 Système hybride contenant l'énergie photovoltaïque :

Ce système rassemble plusieurs sources d'énergie électrique, l'énergie photovoltaïque est l'une des eux. Pour assurer le fonctionnement du système hybride, il est équipé par des convertisseurs statiques pour adapter la fréquence, l'amplitude et la nature d'électricité produite ou utilisée (alternative/continue), ils sont placés entre les sources de production et les charges consommateurs, tout en gardant l'exploitation simultanée de ces différentes sources. (Figure1-12)

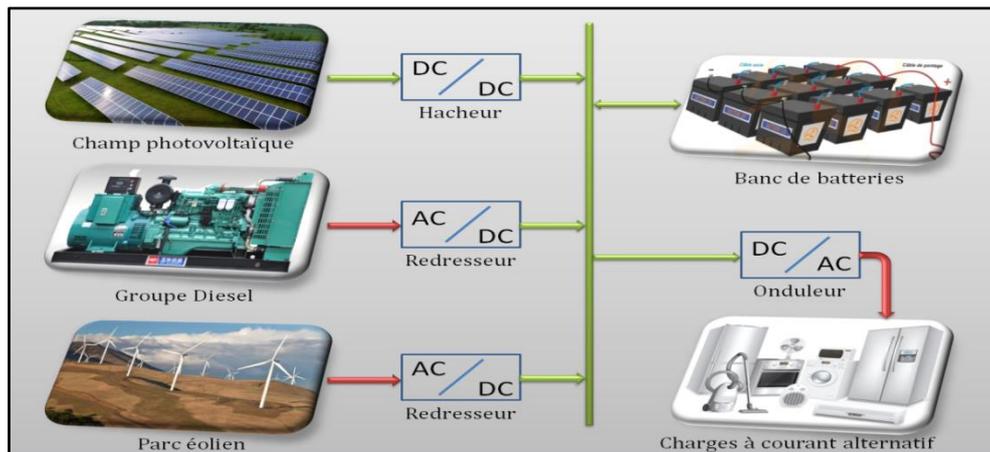


Figure 1- 12 Système électrique hybride

1.7 Les différentes applications de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque peut être utilisée pour différentes applications : sur des vastes sites pour obtenir une grande puissance, dans les avions, les bateaux, les maisons, même dans les satellites ... etc. (Figure1-13)

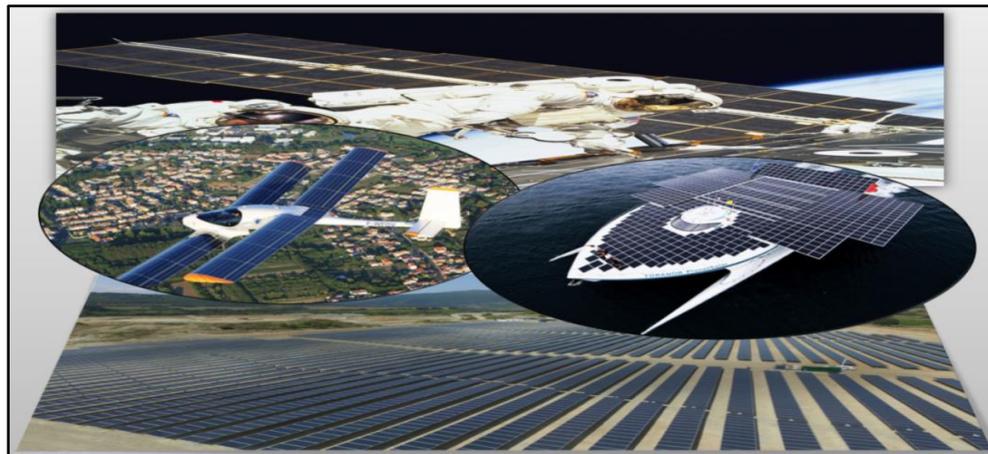


Figure 1- 13 Différentes applications de l'énergie photovoltaïque

1.8 Conclusion :

Dans la présentation précédente, on a expliqué généralement l'énergie photovoltaïque, elle peut résoudre plusieurs problèmes de consommation électrique surtout dans les emplacements où on ne peut pas utiliser le réseau électrique conventionnel comme on a vu dans le titre des applications de l'énergie PV, en notant qu'elle a un faible rendement et on a terminé par les différentes architectures du système PV qui peut exploiter cette énergie.

***Chapitre 2 : Modélisation et
simulation du système
photovoltaïque***

Chapitre 2 : Modélisation et simulation du système photovoltaïque

2.1 Introduction :

Le système photovoltaïque rassemble la source PV (module ou champ PV) et le consommateur d'énergie électrique avec une interface d'adaptation selon le cas d'utilisation.

Dans ce chapitre, on va voir le modèle mathématique de cellule PV l'élément de base d'un module PV, et la simulation d'un module photovoltaïque pour montrer l'influence des différents paramètres sur ses caractéristiques, puis la modélisation du convertisseur DC-DC Buck-Boost.

2.2 Modélisation de cellule photovoltaïque :

Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque se compose d'une source du courant, une diode en parallèle avec celle dernière, une résistance parallèle (shunt) et une résistance série (Figure 2-1).

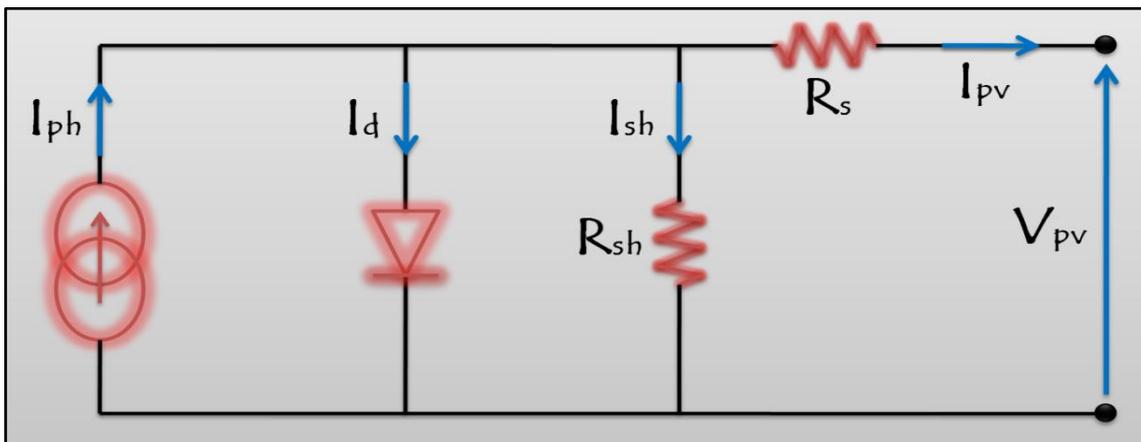


Figure 2 - 1 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

On appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit pour calculer le courant du PV, on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{2.1}$$

Le photo-courant est exprimé par :

$$I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{\psi}{1000} \tag{2.2}$$

Le courant shunt peut être calculé comme suit :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad 2.3$$

Le courant traversant la diode est :

$$I_d = I_0 \cdot (e^{\frac{V_d}{n \cdot V_t}} - 1) \quad 2.4$$

Avec :

$$V_d = V_{pv} + R_s \cdot I_{pv} \quad 2.5$$

Et :

$$V_t = \frac{K T_c}{q} \quad 2.6$$

On remplace les équations (2.5) et (2.6) dans l'équation (2.4) :

$$I_d = I_0 \cdot (e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1) \quad 2.7$$

On remplaçant les équations (2.2), (2.3) et (2.6) dans l'équation (2.1), on obtient :

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot \frac{\psi}{1000} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad 2.8$$

C'est l'expression du courant délivré par la cellule, par laquelle on peut extraire la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.

Avec : ψ : Flux lumineux en $[W/m^2]$

I_{ph0} : Courant de court-circuit pour l'irradiance standard $1000 W/m^2$ en [A]

I_{ph} : Photo courant [A]

I_{pv} : Courant de cellule [A]

V_{pv} : Tension de cellule [v]

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode [A]

I_{sh} : Courant de la résistance shunt [A]

V_t : Tension thermique de la diode [v]

V_d : Tension de la diode [v]

n :Facteur d'idéalité de photopile

K : La constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

q : Charge d'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

T : Température absolue [K°]

2.3 Paramètres d'une cellule PV :

2.3.1 Courant de court circuit (I_{cc}) :

Le courant de court-circuit c'est le courant pour lequel la tension de cellule est nulle. Alors : on remplace la tension V_{pv} par 0 dans l'équation (2.8) pour calculer I_{cc} :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot R_s \cdot I_{cc}}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \quad 2.9$$

Le courant de la diode est négligeable pour la plupart des cellules PV.

Donc :

$$I_{cc} = I_{ph} + \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \quad 2.10$$

Ce qui donne :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad 2.11$$

comme expression approchée du courant I_{cc} .

2.3.2 Tension de circuit ouvert (V_{co}) :

La tension de circuit ouvert est pour laquelle le courant délivré par la cellule est nul.

Alors : on remplace le courant I_{pv} par 0 dans l'équation (2.8) pour calculer V_{co} :

$$0 = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{co}}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad 2.12$$

2.3.3 Facteur de forme (FF) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad 2.13$$

2.3.4 Rendement de conversion n_m :

C'est le paramètre exprimant le rendement de conversion en puissance, on peut le calculer par la relation suivante :

$$n_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{S \cdot \Phi} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i} \quad 2.14$$

Avec : S : Surface de la cellule en $[m^2]$

ϕ : Flux incident en $[W/m^2]$

I_m, V_m : Coordonnées de point de fonctionnement

Il est clair d'après l'équation (2.14) qu'on peut améliorer le rendement η_m , on augmentant le facteur de forme, la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit.

2.4 Influence des paramètres internes sur le module photovoltaïque :

On a utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK (Version 2017), pour simuler un module photovoltaïque avec les paramètres présentés sur le tableau (2.1), et on a ploté les deux caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ tout en variant un paramètre interne avant chaque simulation, et cela pour la résistance série R_s (en Ω) puis pour la résistance shunt R_{sh} (en Ω). Les figures (2-2),(2-3),(2-4)et(2-5) présentent les résultats de simulation dans les conditions standardisées d'irradiance et de température ($1000W/m^2$ et 25 C°).

Tableau 2. 1 Paramètres du module photovoltaïque simulé

Paramètres	Valeurs
Courant de court circuit (I_{cc})	8.21 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	32.9 V
Facteur d'idéalité	1.3
Nombre de cellule en série	54

2.4.1 Influence de la résistance série R_s :

La résistance série est celle due par la masse du matériau semi conducteur constituant les cellules PV et les résistances de contact de la connexion des cellules.

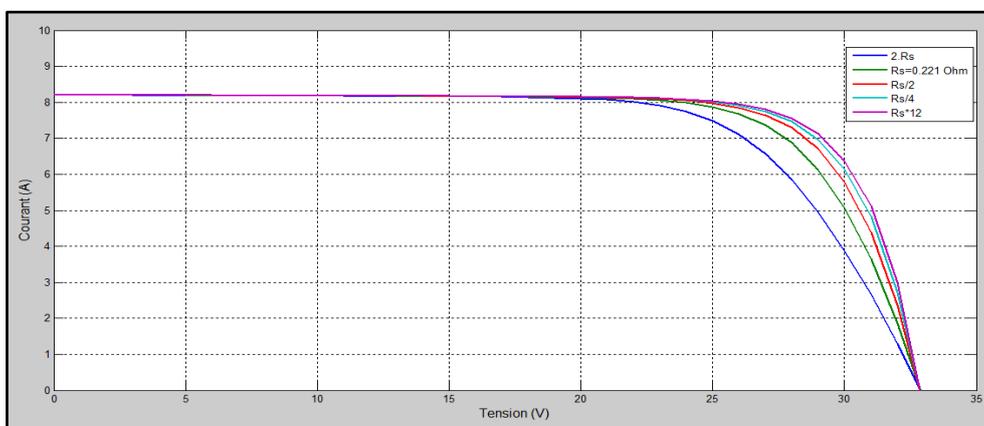


Figure 2 - 2 Influence de variation de la résistance série R_s sur la caractéristique $I=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000W/m^2$ et 25 C°)

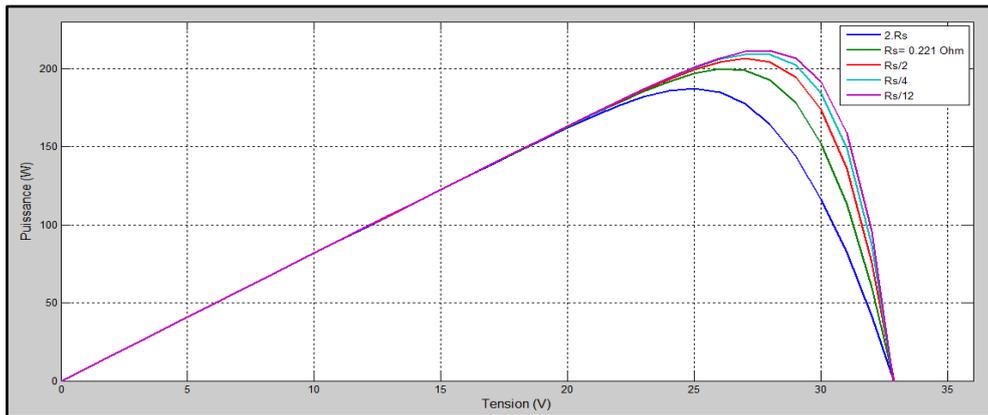


Figure 2 - 3 Influence de variation de la résistance série R_s sur la caractéristique $P=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000\text{W}/\text{m}^2$ et 25C°)

2.4.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh} :

La résistance shunt est celle causée par les fuites autour de la jonction P-N dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

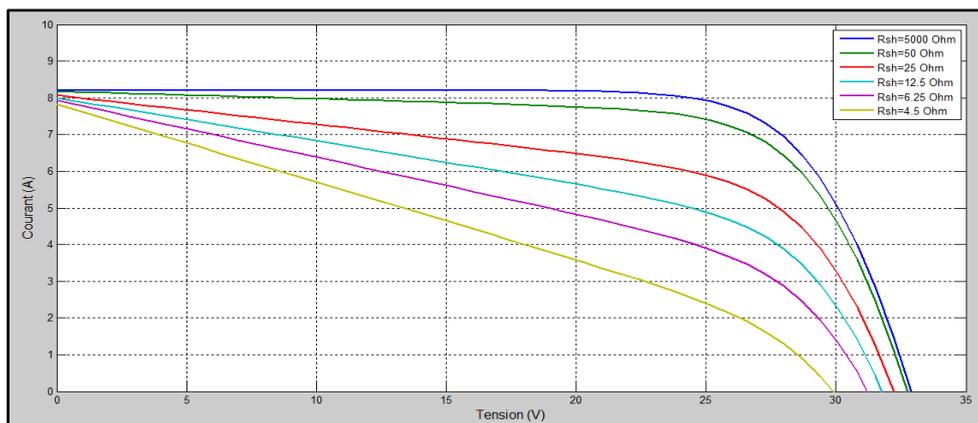


Figure 2 - 4 Influence de variation de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique $I=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000\text{W}/\text{m}^2$ et 25C°)

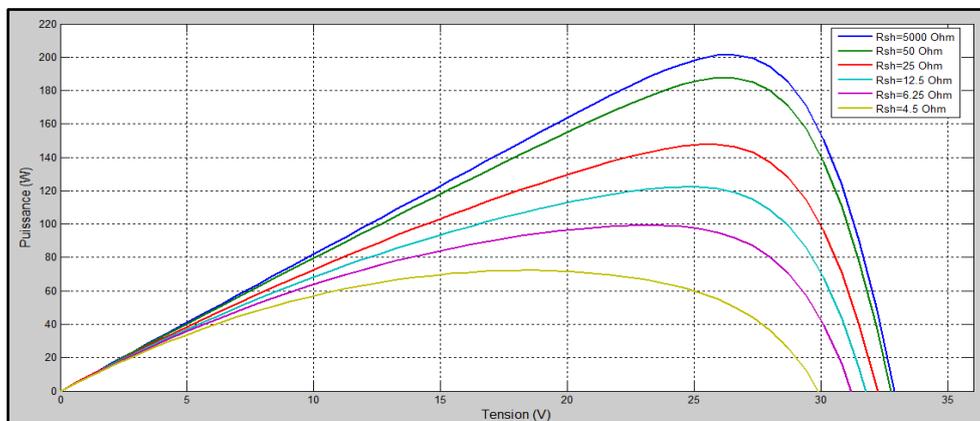


Figure 2 - 5 Influence de variation de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique $P=f(V)$ dans les conditions standardisées ($1000\text{W}/\text{m}^2$ et 25C°)

2.5 Influence des paramètres externes sur le module photovoltaïque :

Cette fois, on a ploté les deux caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$, tout en variant un paramètre externe avant chaque simulation, et cela pour l'irradiance G en (W/m^2) puis pour la température T en (C°). Les figures (2-6),(2-7),(2-8) et(2-9) présentent les résultats de simulation.

2.5.1 Influence d'irradiance G :

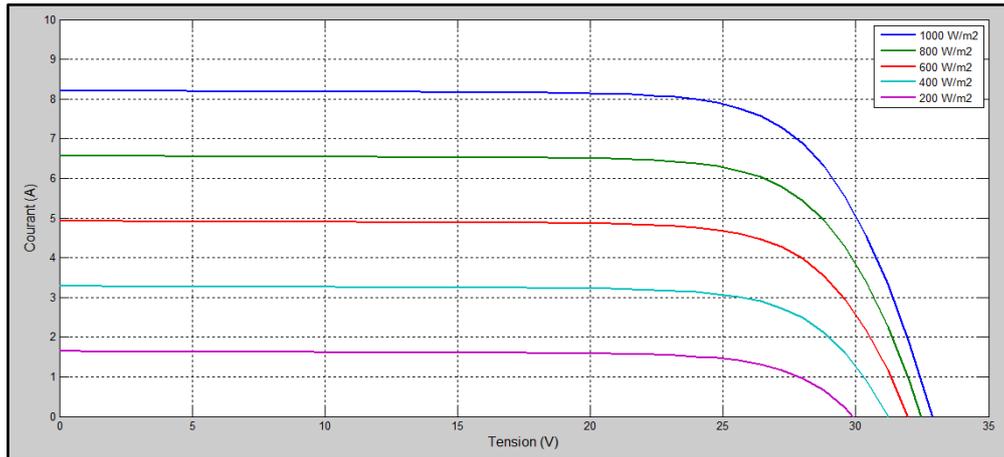


Figure 2 - 6 Courant en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes irradiances (en W/m^2)

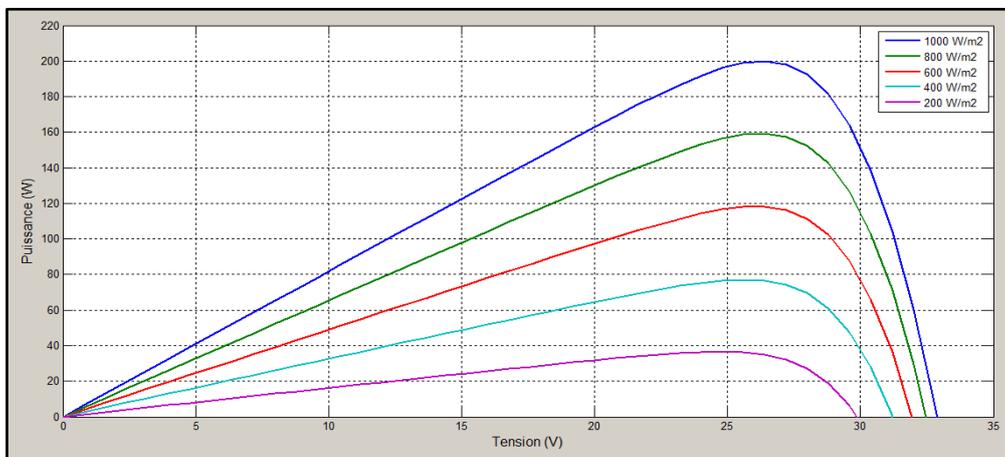


Figure 2 - 7 Puissance en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes irradiances (en W/m^2)

2.5.2 Influence de la température T:

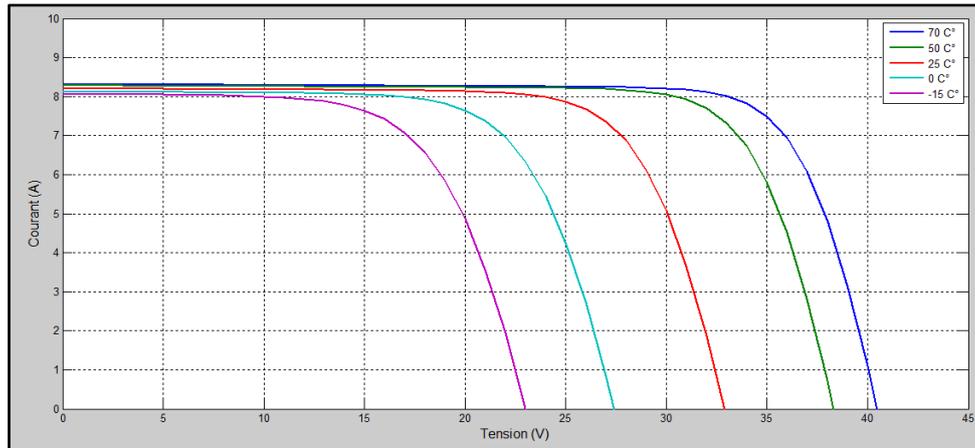


Figure 2 - 8 Courant en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes températures (en C °)

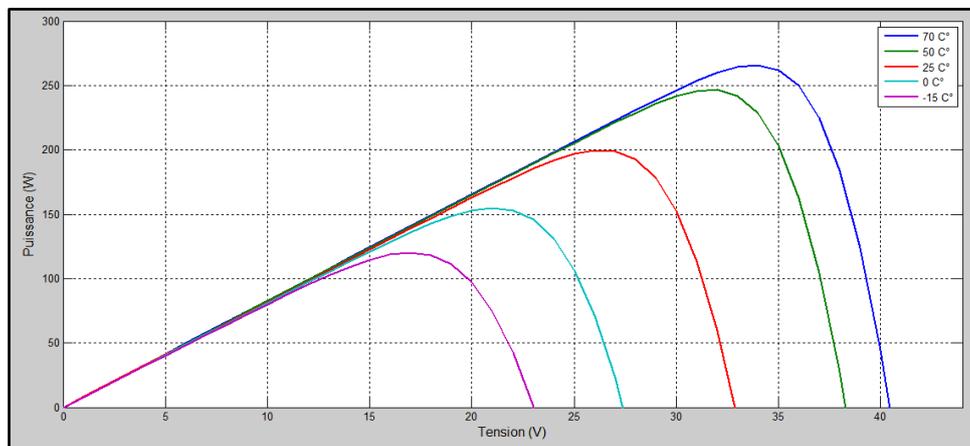


Figure 2 - 9 Puissance en fonction de tension du module photovoltaïque pour différentes températures (en C °)

2.6 Les convertisseurs (DC/DC) :

2.6.1 Convertisseur DC/DC dévolteur(Buck) :

Le convertisseur DC/DC dévolteur (hacheur série) appelé (Buck), sert à convertir une tension d'entrée à une tension de sortie inférieure. (Figure 2-10)

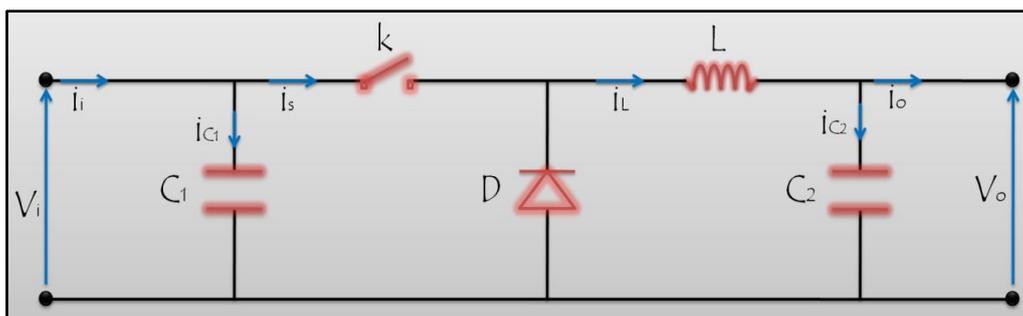


Figure 2 - 10 Schéma électrique de l'hacheur Buck

2.6.2 Convertisseur DC/DC survolteur(Boost) :

Le convertisseur DC/DC survolteur (hacheur parallèle) appelé (Boost), sert à convertir une tension d'entrée à une tension de sortie supérieure. (Figure 2-11)

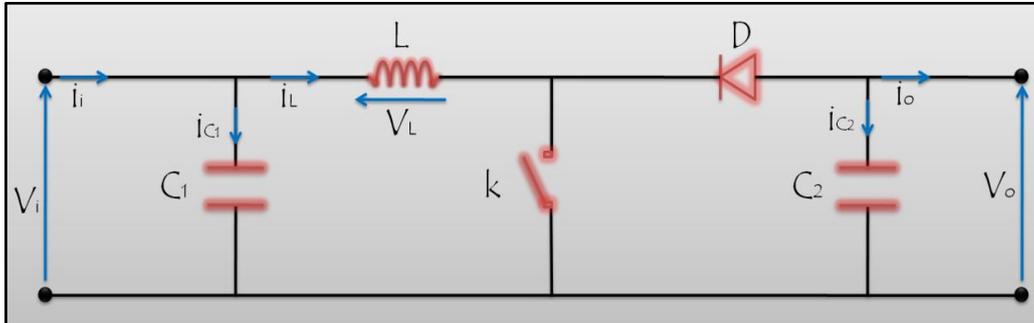


Figure 2 - 11 Schéma électrique de l'hacheur Boost

2.6.3 Convertisseur DC/DC dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

Le convertisseur DC/DC dévolteur-survolteur (Buck-Boost), rassemble les propriétés des deux convertisseurs précédents, il sert à convertir la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure ou supérieure selon le besoin. (Figure 2-12)

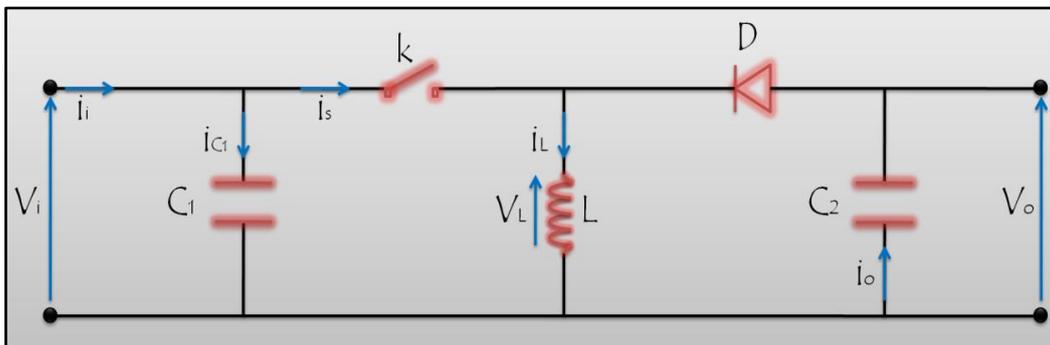


Figure 2 - 12 Schéma électrique de l'hacheur Buck-Boost

2.6.4 Fonctionnement de l'hacheur Boost :

La figure ci-dessous montre les schémas équivalents de l'hacheur Boost (Figure 2-13):

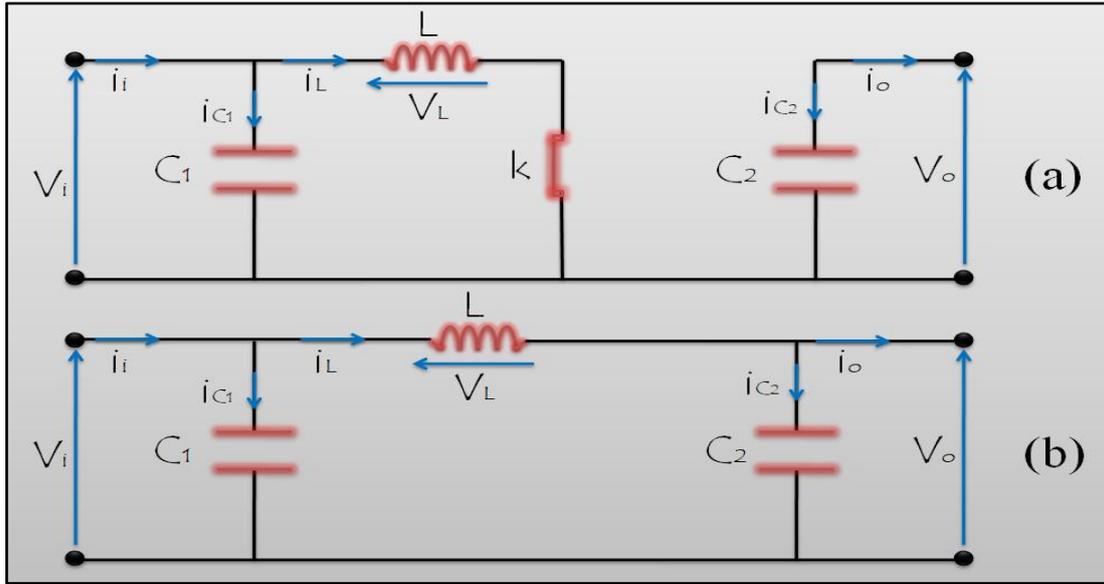


Figure 2 - 13 Circuit équivalent de l'hacheur Boost : k fermé (a) , K ouvert (b)

L'interrupteur K est fermé (Période $\alpha \cdot T_e$) : (Figure 2- 13 (a))

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C_1}(t) = C_1 \cdot \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C_2}(t) = C_2 \cdot \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{array} \right. \quad 2.15$$

L'interrupteur K est ouvert (Période $(1-\alpha) \cdot T_e$) : (Figure 2- 13(b))

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C_1}(t) = C_1 \cdot \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C_2}(t) = C_2 \cdot \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{array} \right. \quad 2.16$$

La représentation dynamique valable pour la période T_e complète est présentée par la relation suivante :

$$\frac{dx}{dt} T_e = \frac{dx}{dV_{\alpha \cdot T_e}} \alpha \cdot T_e + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha) \cdot T_e}} (1-\alpha) \cdot T_e \quad 2.17$$

Pour conclure le modèle approximé (2.18) de l'hacheur Boost, on applique la relation (2.17) sur les systèmes des équations (2.15) et (2.16) :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L(t) = i_i(t) - C_1 \cdot \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1-\alpha) \cdot i_L(t) - C_2 \cdot \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} + (1-\alpha)V_o(t) \end{array} \right. \quad 2.18$$

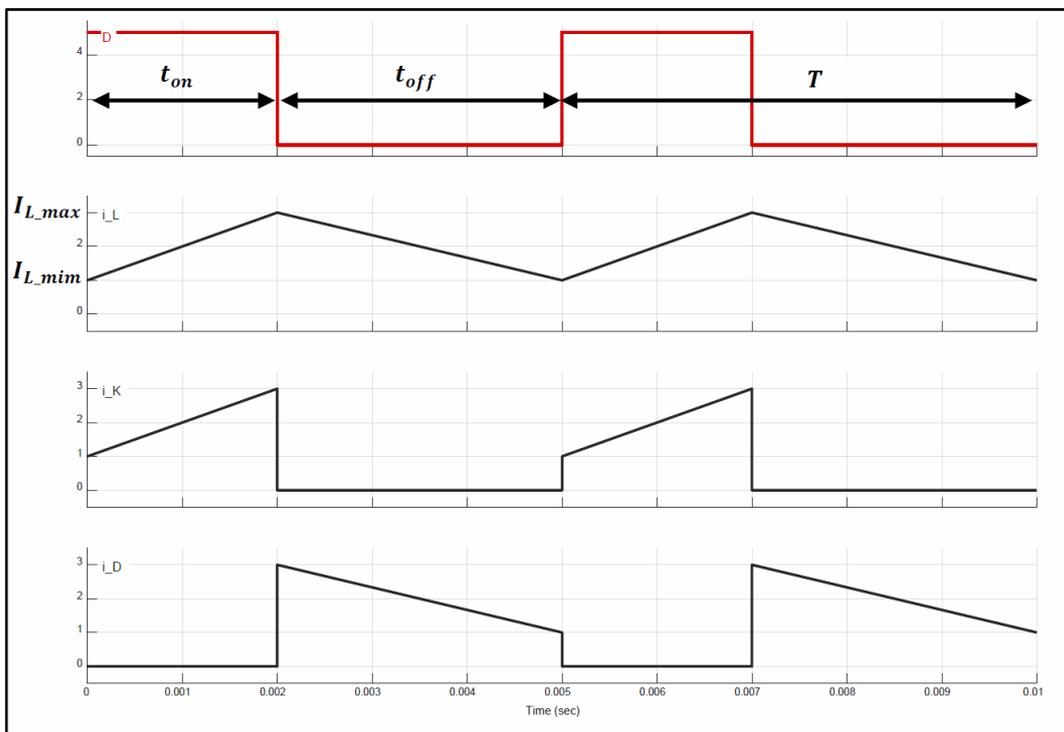


Figure 2 - 14 Chronogramme de fonctionnement de l'hacheur Boost

Lors de la fermeture de l'interrupteur K, c'est-à-dire l'hacheur est excité, le courant i_L s'augmente linéairement de i_{L_min} jusqu'au i_{L_max} , et le courant traversant la diode i_D égale à 0 ce qui peut être interprété par la 1^{ère} équation du système (2.15) et la figure (2-13 (a)) et cela durant la période t_{on} . ([0 à 0.002] et [0.005 à 0.007] dans ce cas).

Lors de l'ouverture de l'interrupteur K, c'est-à-dire l'hacheur n'est pas excité, le courant i_L commence son diminution à partir de i_{L_max} pour arriver une autre fois à la valeur i_{L_min} et le courant traversant la diode i_D durant la période t_{off} ([0.002 à 0.005] et [0.007 à 0.01] dans ce cas). (Figure 1- 14)

2.7 Conclusion :

Le système photovoltaïque est nécessaire pour gérer, adapter, et utiliser l'énergie photovoltaïque.

D'après le chapitre précédent, pour chaque variation de l'irradiance ou de la température il y a un point de puissance apparaît dans la caractéristique $P=f(V)$ du module PV appelé le point de puissance maximale (MPP).

Il est clair alors, que la meilleure exploitation du module PV est réalisée en utilisant un contrôleur gardant le fonctionnement du module PV toujours dans ce point, c'est l'MPPT.

***Chapitre 3 : Poursuite du
point de puissance
maximale MPPT du système
photovoltaïque par la
méthode PSO***

Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

3.1 Introduction :

Plusieurs techniques sont utilisées pour suivre le point de puissance maximale d'une source PV, les plus développées se basent sur les méthodes méta heuristiques.

Dans ce chapitre on va expliquer le point de puissance maximale et citer des méthodes permettant de suivre ce point, puis expliquer l'une des méthodes méta heuristiques qui base sur l'algorithme PSO, son principe, et la technique d'application de cet algorithme sur l'MPPT appliquée sous les conditions d'ombrage partiel (PSC) en utilisant un organigramme explicatif.

3.2 Poursuite du point de puissance maximale MPPT :

Pour tracer le point MPP (Maximum Power Point) du module photovoltaïque simultanément avec la caractéristique $P=f(V)$, on a utilisé le programme suivant (Figure3-1), après l'exécution de simulation du module PV.

```
Pmax = max(P); % Déterminer la valeur de puissance maximale dans la caractéristique P=f(V)
Vmax = find(P==Pmax); % Déterminer l'ordre de tension correspondante à la puissance maximale dans le vecteur des tension
Vpmax = V(Vmax); % Conclure la valeur de tension correspondante à la puissance maximale
plot(V,P) % Tracer la caractéristique P=f(V) du module
hold on
plot(Vpmax,Pmax,'or') % Tracer le point de puissance maximale MPP fournie par le module simulé sous forme d'un cercle rouge
```

Figure 3- 1 Programme de détermination de l'MPP

La variation de la température et de l'irradiance appliquées sur le panneau PV provoque une dégradation ou une augmentation de sa puissance générée.

La tension et le courant fournis, sont captés et envoyés vers un contrôleur programmé à la base d'un algorithme d'optimisation prédéterminé, de telle façon qu'il extrait la puissance maximale parmi les puissances générées par le panneau pour toutes températures et irradiances appliquées, d'après cette résultat, il agit sur le convertisseur DC-DC pour convertir sa tension d'entré à une tension de sortie correspondante à la puissance maximale appelée la tension optimale $V_{optimale}$, on peut visualiser cette correspondance dans la caractéristique $P=f(V)$. (Figure 3-2)

Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

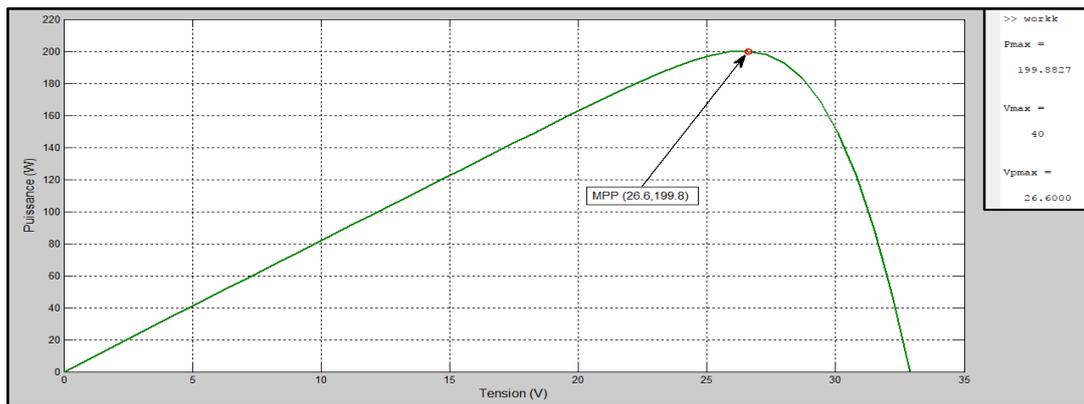


Figure 3- 2 Le point MPP et la tension $V_{optimale}$ dans la caractéristique $P=f(V)$

Cette technique - appelée MPPT - sert à garder toujours le fonctionnement du panneau dans son point de puissance maximale, pour toute température et irradiance appliquées sur le module PV. (Figure 3-3)

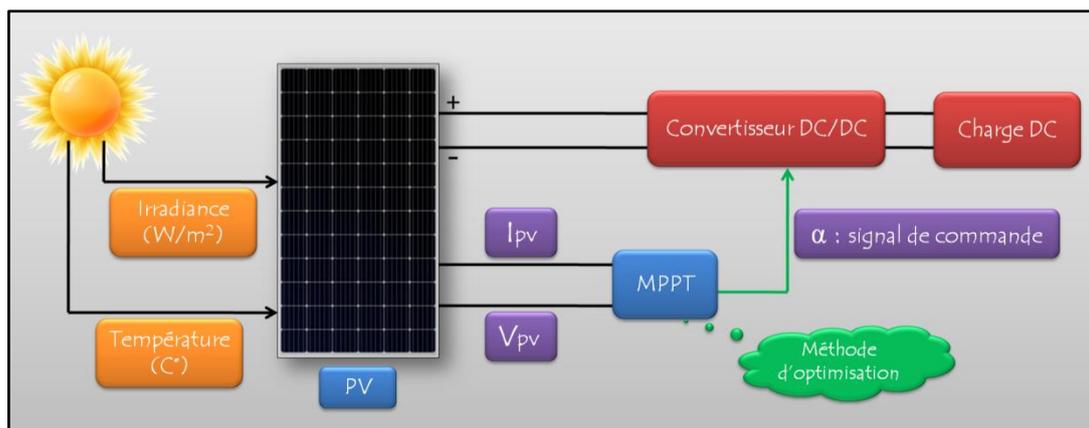


Figure 3- 3 Un système PV dont le fonctionnement est gardé dans le point MPP

Les techniques MPPT sont apparues depuis 1968 en commençant par les applications spatiales, on peut trouver actuellement dans la littérature scientifique plus d'une vingtaine de méthodes MPPT. Ces techniques varient dans la complexité, la rapidité, la robustesse, et la stabilité. [HAD18]. On cite plusieurs techniques pour suivre le point de puissance maximale :

- Perturbation et observation (P&O).
- Conductance incrémental (IC).
- Contrôleur Flou (FLC).
- Algorithme génétique (GA).

Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

- L'optimisation par l'essai particulaire (PSO).

3.3 Champ PV sous PSC :

3.3.1 Les conditions d'ombrage partiel (PSC) :

En réalité, il est possible que les cellules du module PV ne soient pas toutes sous les mêmes conditions d'éclairage (température, irradiance), par l'effet d'ombrage partiel causé par l'ombre des arbres ou des maisons, les salissures ou les neiges par exemple. Ce phénomène provoque une diminution du courant de la cellule ombrée et alors l'augmentation de la tension aux bornes de cette dernière et l'apparition d'une surchauffe, comme ça la cellule présente un point chaud (Hot Spot).

3.3.2 La protection du champ PV:

Pour éviter le problème du point chaud, une diode est placée aux bornes de chaque cellule (ou de chaque groupe de cellules montées en série) pour circuler le courant fourni par les cellules en by-passant celles qui sont ombrées, c'est la diode by-pass. La même chose pour une chaîne des modules PV (string) ou un champ PV dont une partie est éclairée et l'autre est ombrée. (Figure 3-4).

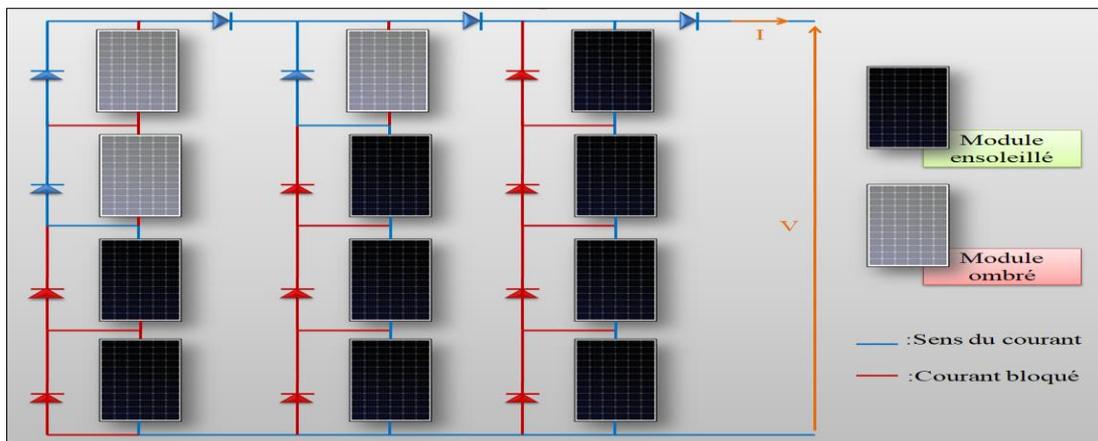


Figure 3- 4 Champ photovoltaïque sous les conditions PSC

Lorsque les modules sont montés en parallèle, l'un entre eux peut être ombré, il va recevoir donc la puissance fournie par un autre module normalement ensoleillé, ainsi, il peut être un récepteur par rapport à la batterie en cas d'ombrage complet du champ PV ou dans la nuit. Une diode est placée à la sortie de chaque module dont l'anode est à côté de ce module pour

empêcher la circulation du courant vers ce dernier (de la batterie ou des autres modules), c'est la diode anti-retour. (Figure 3-5)

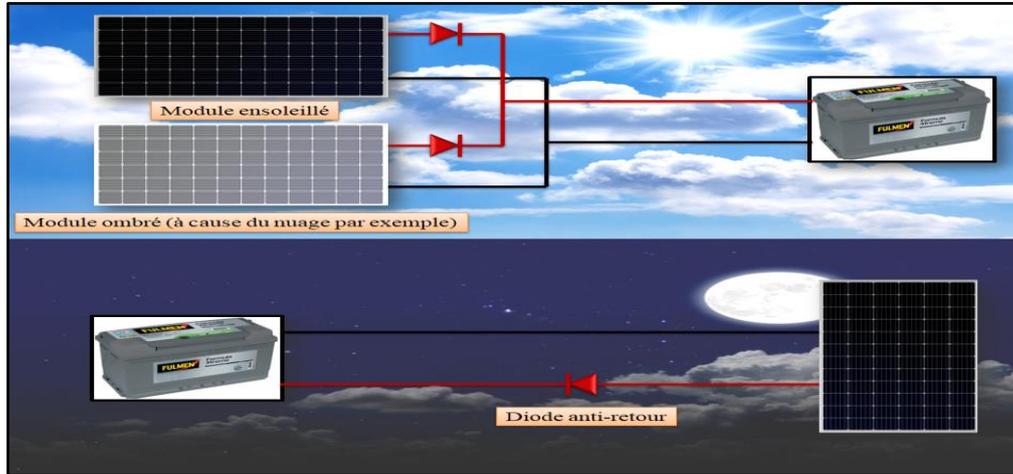


Figure 3- 5 Le rôle de la diode anti-retour

3.4 La méthode d'optimisation par l'essai particulaire (PSO) :

3.4.1 Description et historique de la méthode PSO :

L'inspiration de l'algorithme d'essaim de particules est de simuler la navigation et la recherche d'un essaim d'oiseaux ou d'un banc de poissons. PSO a été développé par James Kennedy et Russel Eberhart en 1995 tout en étudiant les comportements sociaux des animaux travaillant en essaims. Le PSO recherche une optimisation de haute qualité en affinant, itérativement, une solution candidate. PSO utilise moins de ressources que les autres techniques d'optimisation. [Art19]

3.4.2 Principe de la méthode PSO :

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position x_i et une vitesse v_i (déplacement). De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance P_{op-i} (en position et en vitesse) et de la meilleure performance atteinte par les particules de l'essaim P_{op-g} . Lors de son déplacement, la particule est influencée par les composantes suivantes :

Composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.

Composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.

Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

Composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par les autres particules. [HAD18] (Figure 3- 6)

Le déplacement de la particule est exprimé par les équations suivantes :

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad , \quad \text{tel que } : i \in \{1, \dots, n_p\} \quad 3.1$$

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [P_{op-i} - x_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [P_{op-g} - x_i(t)] \quad 3.2$$

Avec : $x_i(t)$: la position de la particule i à l'instant t .

$x_i(t + 1)$: la position de la particule i à l'instant $t+1$.

$v_i(t)$: la vitesse de la particule i à l'instant t .

$v_i(t + 1)$: la vitesse de la particule i à l'instant $t+1$.

P_{op-i} : la meilleure position locale (de la particule i).

P_{op-g} : la meilleure position globale (de toutes les particules de l'essaim).

w : coefficient d'inertie (Constante).

r_1 et r_2 : nombres aléatoires entre 0 et 1.

c_1 et c_2 : coefficients d'accélération (constantes).

n_p : nombre des particules dans l'espace de recherche.

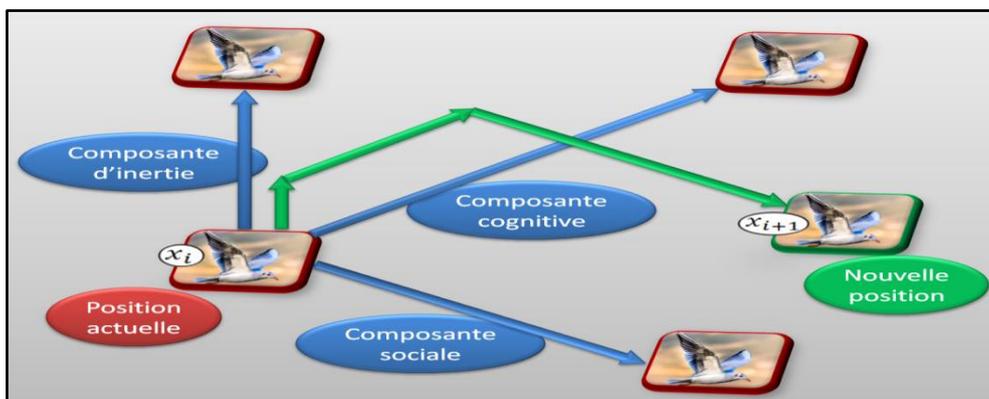


Figure 3- 6 Principe du déplacement des particules dans l'espace de recherche (exemple des oiseaux)

3.4.3 Application de la méthode PSO sur l'MPPT :

Lors de l'application de la technique du PSO pour suivre le point de puissance maximale MPP, chaque paramètre de l'algorithme PSO aura son équivalent dans les paramètres de la technique MPPT, et cela peut être exprimé comme suit :

$$\Delta D_i \iff x_i$$

$$\Delta D_i \iff v_i$$

$$P_{op_i} \iff D_{op_i}$$

$$P_{op_g} \iff D_{op_g}$$

$$F(x) \iff P(D)$$

Pour mieux comprendre, on réécrit les équations (3.1) et (3.2) en utilisant les paramètres de l'MPPT :

$$D_i(t + 1) = D_i(t) + \Delta D_i(t + 1) \quad , \quad \text{tel que } : i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (3.3)$$

$$\Delta D_i(t + 1) = w \cdot \Delta D_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [D_{op_i} - D_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [D_{op_g} - D_i(t)] \quad (3.4)$$

Tel que :

$D_i(t + 1)$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$.

$D_i(t)$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant (t) .

$\Delta D_i(t + 1)$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$.

D_{op_i} : Le meilleur rapport cyclique de la particule i .

D_{op_g} : Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim).[HAD18]

L'organigramme suivant explique les étapes de cette application : (Figure 3-7)

Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

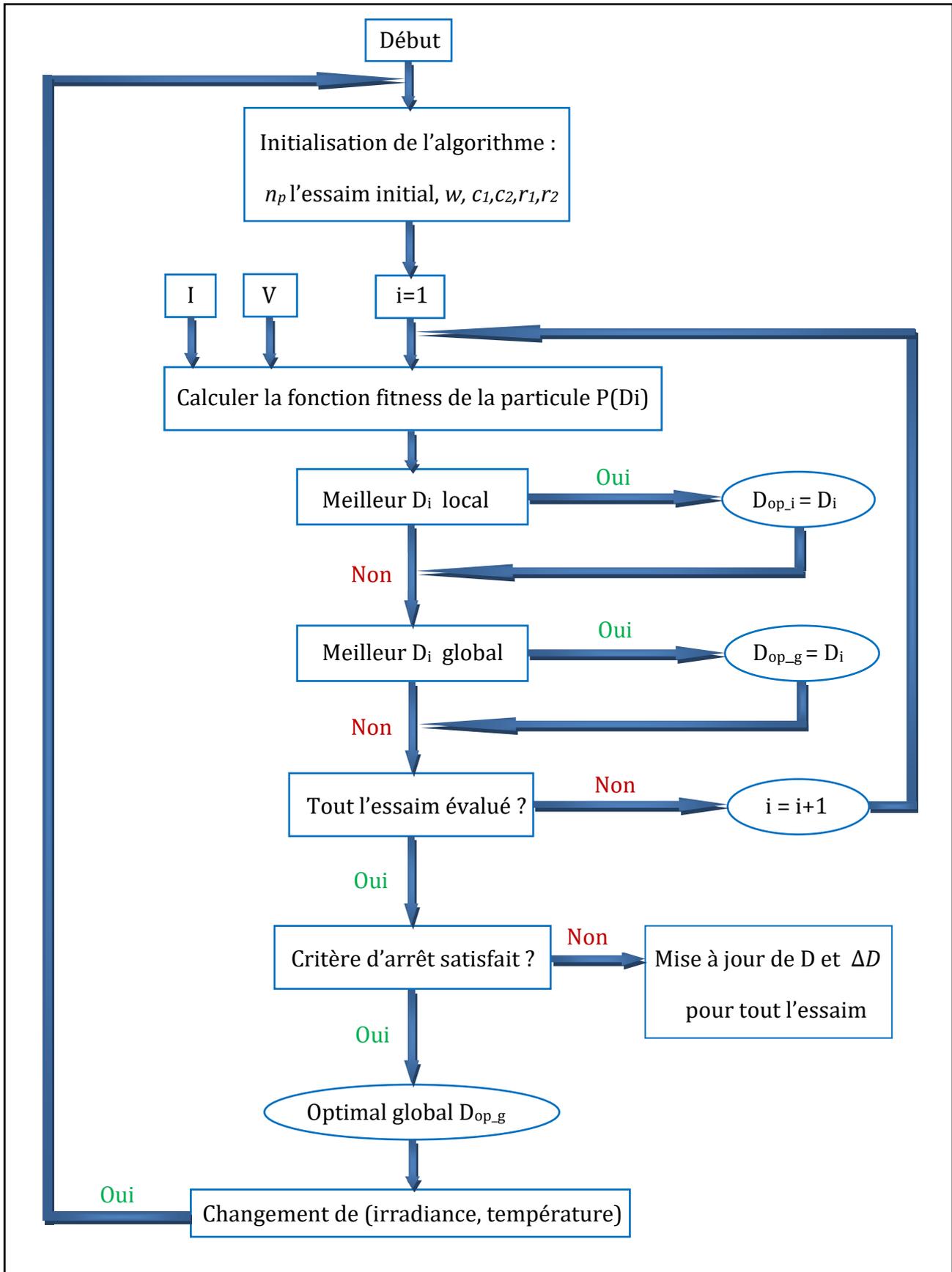


Figure 3- 7 Organigramme de la méthode PSO pour réaliser l'MPPT

3.5 Schéma d'un système photovoltaïque sous PSC dont le MPP est suivi à base de l'algorithme PSO :

La (Figure 3-8) rassemble tout les éléments d'un système photovoltaïque sous les conditions d'ombrage partiel (PSC), dont le point de puissance maximale est suivi par la méthode MPPT basant sur l'algorithme PSO :

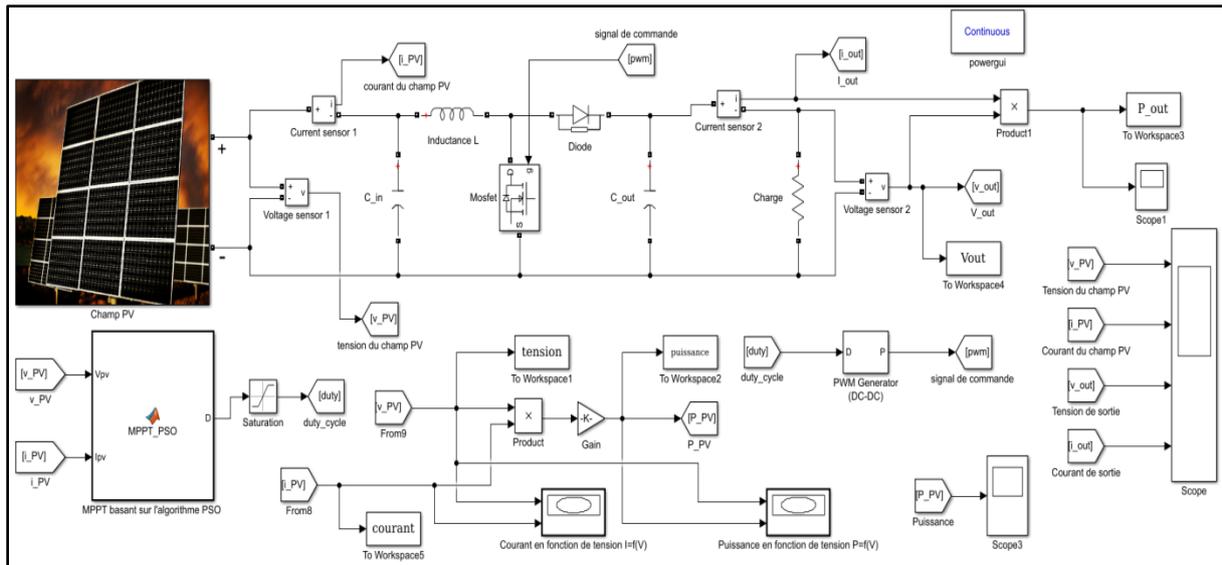


Figure 3- 8 Schéma de la méthode MPPT basant sur l'algorithme PSO sous MATLAB/SIMULINK

Pour suivre le point de puissance maximale, le courant et la tension fournis par le champ PV sont captés et envoyés vers un contrôleur programmé à la base de l'algorithme PSO, ce dernier calcule la puissance maximale (comme on a expliqué dans la partie précédente) produite pour chaque i_{PV} et v_{PV} reçus ,il conclut alors le $duty_cycle$ (entre 0 et 1) qui va être converti à la forme d'un signal analogique (PWM) attaque directement la gâchette du "mosfet" pour commander le convertisseur DC/DC, et cela pour garder le fonctionnement à une tension dite $V_{optimale}$ qui est correspondante à la puissance maximale. Dans ce travail on a appliqué les conditions PSC pour voir les résultats lorsque les modules du champ PV ne soient pas exposés aux mêmes conditions d'éclairage.

Le block "Chap PV" présenté dans la (Figure 3-8) se compose des modules montés en série plus une diode by-pass installée en parallèle avec chacun d'entre eux, ils ont exposé à la même température mais aux différentes irradiances pour simuler les conditions d'ombrage partiel (PSC). (Figure 3-9)

Chapitre 3 : Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

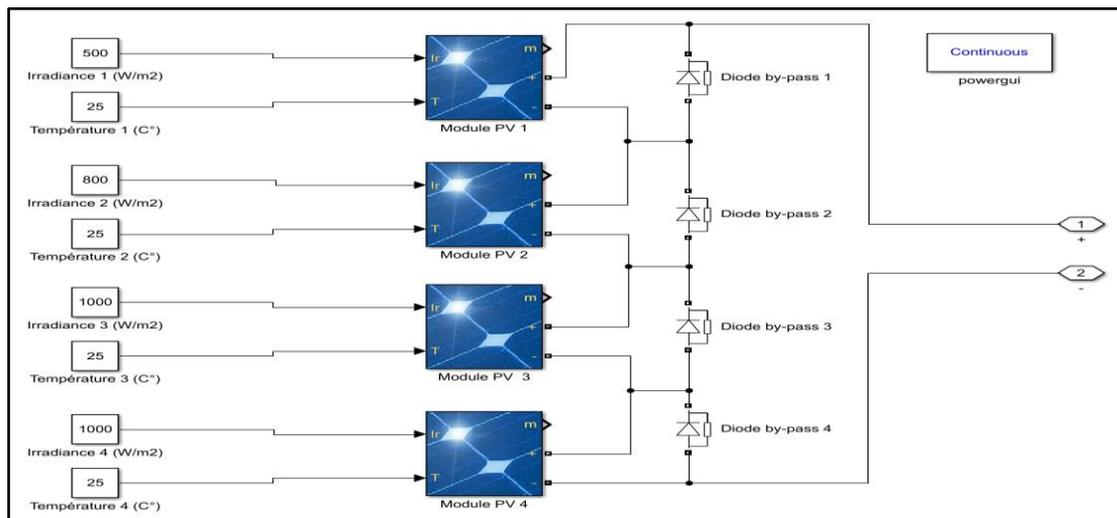


Figure 3- 9 Composition du block "Champ PV" présenté sur la (Figure 3-8)

3.6 Conclusion :

Le chapitre précédent a détaillé la technique MPPT étudiée et appliquée sur un champ PV alimentant une charge purement résistive sous les conditions PSC, on conclut que ces conditions nécessitent l'installation des diodes by-pass pour garantir la sécurité du champ PV et éviter le point chaud (hot spot).

Ainsi, l'installation des diodes by-pass, provoque l'apparition de plus qu'un seul pic de puissance, ceux sont les points de puissances maximale locaux et globale, et cela, on va le remarquer à travers la caractéristique puissance en fonction de tension d'un champ PV sous les conditions PSC dans le chapitre suivant, lors de l'application de la technique MPPT simulée.

La technique MPPT étudiée basant sur la méthode méta heuristique PSO montre que chaque particule utilise trois composantes : cognitive, sociale et inertielle pour chercher le point optimal global exprimé par le point de puissance maximale global dans notre mémoire.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter les différents résultats de simulation obtenus dans ce travail, commençant par le caractéristique $P=f(V)$ d'un champ PV fonctionnant sous une condition d'éclairage uniforme puis la simulation de la même caractéristique sous les conditions PSC, ensuite la simulation de l'hacheur boost utilisé dans notre étude, terminant par l'exécution de la simulation de méthode MPPT basée sur l'algorithme PSO et appliquée sur ce champ PV, schématisée dans le chapitre précédent.

4.2 La caractéristique $P=f(V)$ du champ PV simulé:

Après l'exécution du modèle de simulation présenté dans la (Figure3-7), on a ploté la caractéristique $P=f(V)$ pour obtenir les résultats suivants :

4.2.1 La caractéristique puissance en fonction de tension d'un champ PV sous une irradiance uniforme :

On a utilisé la simulation présentée sur la (Figure 3- 7) pour ploter la puissance du champ PV en fonction de sa tension en appliquant la même irradiance sur tout les modules, et cela pour obtenir la caractéristique demandée sous une irradiance uniforme. (Figure 4-1)

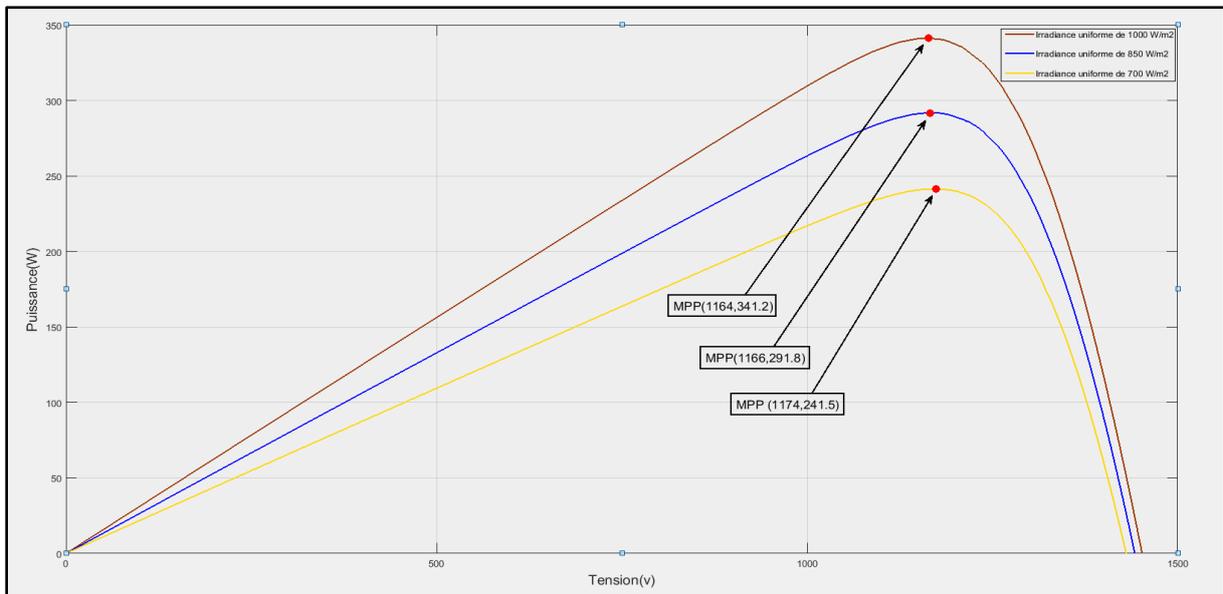


Figure 4- 1 La caractéristique $P= f(V)$ pour un champ PV sous différentes irradiances uniformes

Commentaire et interprétation :

On remarque que pour chaque irradiance il y a un point de puissance maximale, il est clair d'après la figure que ce dernier s'augmente pour une irradiance plus élevée.

Et parce que le champ simulé se compose d'un groupe de modules montés en série, on peut interpréter les tensions fournies par ce champ à partir du nombre de ces modules et la tension fournie par chaque module .Le (Tableau 4- 1) explique le cas par chiffres en prenant l'exemple de 1000 W/m^2 (Courbe rouge de la figure 4-1).

Tableau 4. 1 Caractéristiques du champ PV simulé

Nombre de modules en série	40
Nombre de modules en parallèle	40
Tension fournie par chaque module	36.3 V
Tension du champ photovoltaïque	1452 V

4.2.2 La caractéristique puissance en fonction de tension d'un champ PV sous les conditions PSC :

On a utilisé la même simulation (Figure3-7) pour ploter le caractéristique $P=f(V)$ mais cette fois on a appliqué des différentes irradiances sur les modules pour simuler le champ sous les conditions d'ombrage partiel (PSC). (Figure 4-2)

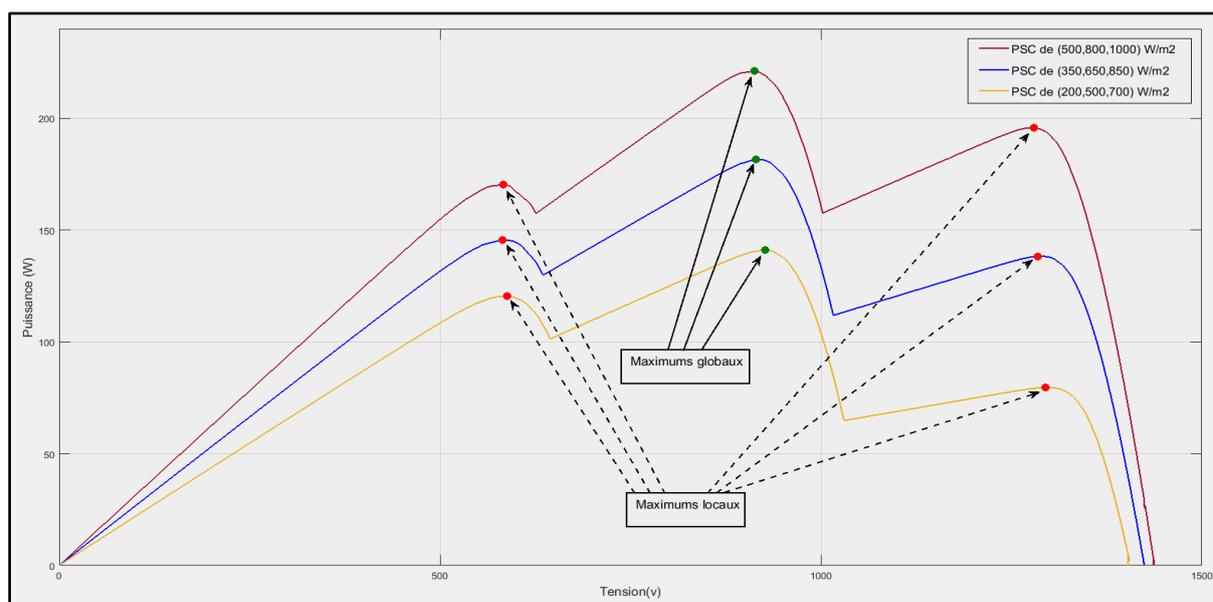


Figure 4- 2 La caractéristique $P=f(V)$ pour un champ PV sous différentes conditions d'ombrage partiel (PSC)s

Commentaire et interprétation :

Dans la caractéristique $P=f(V)$, on remarque l'apparition des plusieurs points de puissance maximale (trois points dans ce cas), l'une présente le point désiré et visé par la technique MPPT qu'on va l'appliquer, c'est le point de puissance maximale global et les deux autres sont les points de puissance maximale locaux qui présentent seulement un pic de puissance.

On interprète ce résultat par la différence d'éclairage entre les modules du champ PV (conditions PSC) dont la caractéristique $P=f(V)$ est tracée ainsi que les diodes by-pass installées pour résoudre le problème du point chaud et assurer la sécurité du champ PV.

Il est clair aussi d'après ce résultat que pour une condition PSC à des valeurs d'irradiances plus élevées, la caractéristique $P=f(V)$ vers le haut sur l'axe vertical ce qui montre l'augmentation de puissance produite.

4.3 Simulation de l'hacheur boost :

Le schéma ci-dessous présente l'hacheur boost sous MATLAB/Simulink : (Figure 4-3)

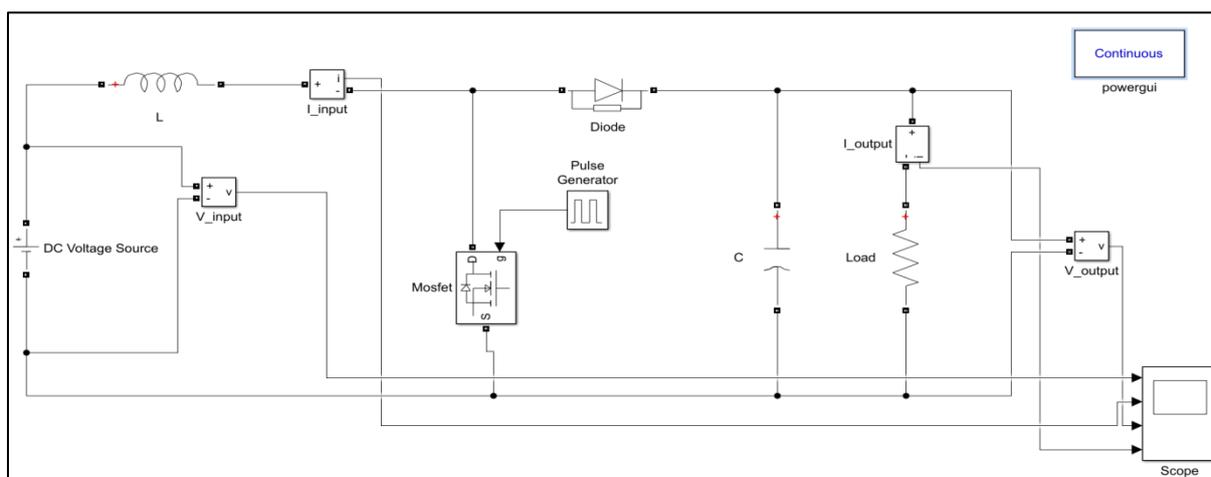


Figure 4- 3 Schéma de l'hacheur élévateur (boost) sous Matlab/Simulink

La simulation présentée contient une source de tension d'entrée continue et une inductance permet de fixer l'ondulation du courant (courant continu) avec une capacité installée en parallèle avec la charge purement résistive sert à plus une diode pour piéger le courant dans la boucle lorsque le mosfet est bloqué.

Cette simulation présente la conversion continue/continue à travers l'hacheur boost qu'on a utilisé dans ce travail, pour faire sortir une tension contrôlable et cela pour pouvoir sélectionner à chaque instant la tension $V_{optimale}$ correspondante à la puissance optimale.

Les figures (4-4) et (4-5) affichent la tension et le courant d'entrée et de sortie de l'hacheur simulé :

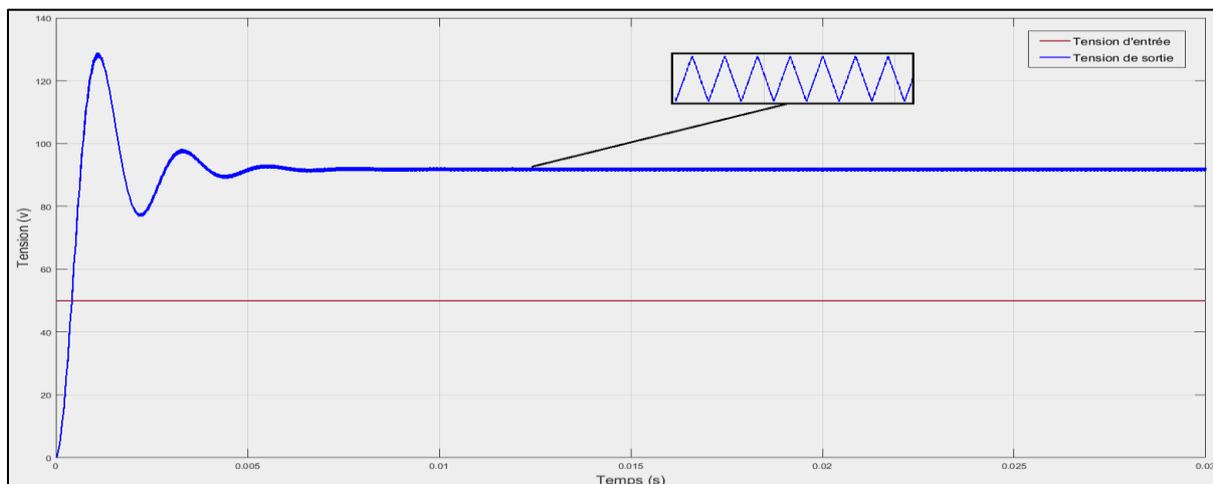


Figure 4- 4 Tensions d'entrée et de sortie en fonction du temps

D'après la figure (4-4), on remarque que la tension de sortie (qui atteint le 73 v au régime permanent) est plus élevée à celle d'entrée (50v), ce qui justifie la tâche de l'hacheur élévateur (boost).

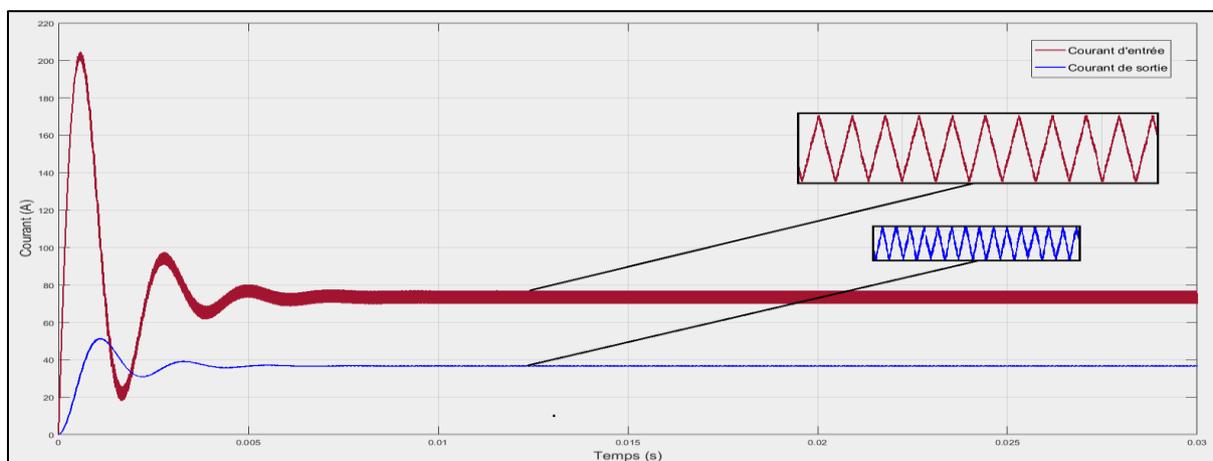


Figure 4- 5 Courants d'entrée et courant de sortie en fonction du temps

D'après la figure (4-5), il est remarquable que les deux courants (d'entrée et de sortie) ont la même forme mais avec différentes amplitudes en (A).

Le courant de sortie est plus faible à celui d'entrée, et cela peut être interprété par le principe de conservation de puissance dans les convertisseurs statiques :

$$P_{\text{input}} = I_{\text{input}} \times V_{\text{input}} = 73 \times 50 = 3650 \text{ w}$$

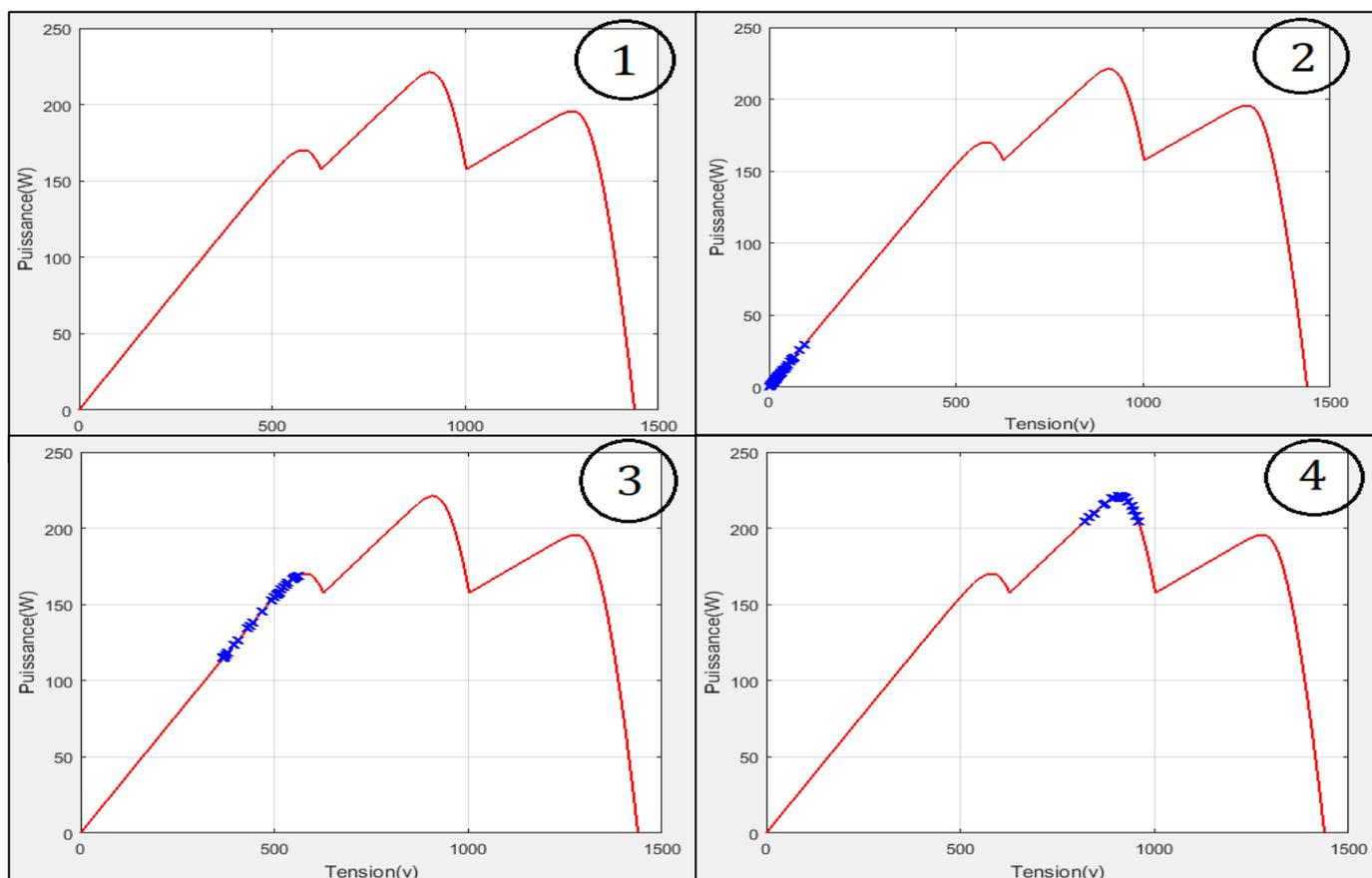
$$P_{\text{output}} = I_{\text{output}} \times V_{\text{output}} = 37.5 \times 95 = 3562 \text{ w}$$

Alors : $P_{\text{input}} \approx P_{\text{output}}$ (Perte de 88 w) c'est-à-dire une perte de 2.41% de la puissance produite par le champ PV.

On doit aussi signaler que d'après les deux figures précédentes le temps de réponse très court qui n'atteint pas le « 10 ms », ce qui montre la rapidité du convertisseur DC/DC simulé.

4.4 Poursuite du point MPP par la méthode MPPT basée sur PSO :

A travers l'exécution de la simulation schématisée sur la figure (3- 8) du 3^{ème} chapitre, on a obtenu la poursuite du point de puissance maximale globale appartient à la courbe présentée sur la (Figure 4-2) du champ PV sous PSC. Les figures ci dessous expliquent étape par étape la procédure de poursuite du MPP à base de l'algorithme PSO : (Figure 4-6)



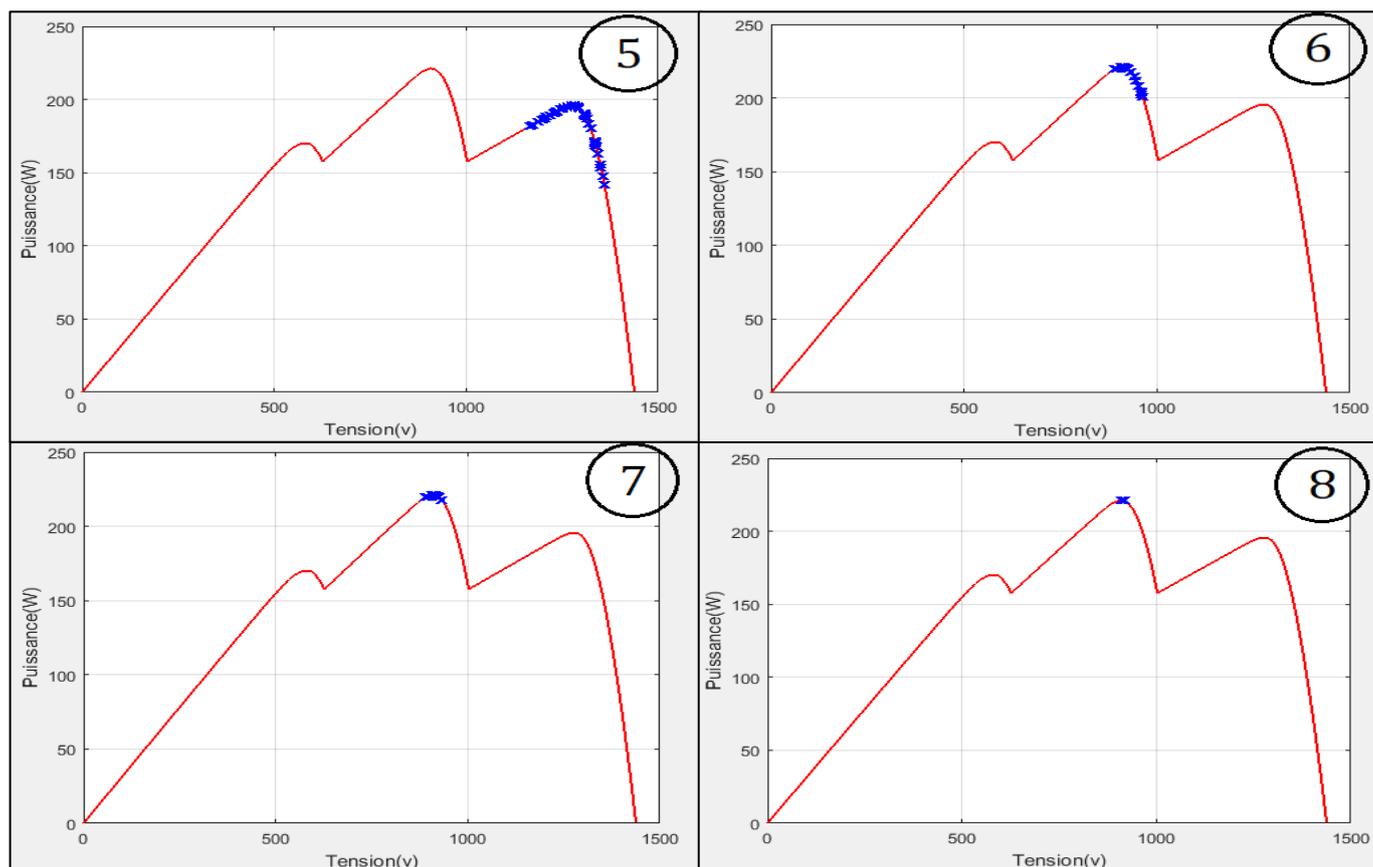


Figure 4- 6 Quelques étapes de procédure de la technique MPPT basant sur PSO

Commentaire et interprétation :

La 1^{ère} étape montre seulement la caractéristique puissance en fonction de tension, il est clair qu'il y a un point de puissance maximale global plus deux points de puissance maximale locaux, c'est-à-dire il y a plus qu'un seul pic de puissance ce qui montre que le champ PV est sous les conditions d'ombrage partiel(PSC).

Puis, dans la 2^{ème} étape, on remarque le départ du fonctionnement de technique MPPT appliquée pour chercher les points de puissance maximale (points locaux+point global).

Ensuite, on remarque que la technique MPPT appliquée commence à confiner les points de pic de puissance, trois pics sont obtenus, chaque pic présente un point de puissance optimal local correspondant à un rapport cyclique D_{opt_i} (3^{ème} étape + 4^{ème} étape + 5^{ème} étape).

Parmi les points de puissance traversés à travers le calcul de la fonction fitness, le programme choisit le point qui à la puissance la plus élevée entre les trois points obtenus et classés comme des points de puissance optimales locaux, c'est le point de puissance optimal

global qui sera alors correspondant au rapport cyclique D_{opt_g} , et cela est très clair dans la 6^{ème} étape.

Les deux dernières étapes, montrent la précision de la technique lors de l'application du rapport cyclique D_{opt_g} , pour garder le fonctionnement du système photovoltaïque à la tension dite $V_{optimale}$ correspondante au point de puissance maximale globale montrés dans la 8^{ème} étape.

Le meilleur avantage qu'on doit le signaler donc d'après ces résultats, c'est que la méthode appliquée peut atteindre le point de puissance maximale global, au contraire des méthodes classique comme perturbe & observe (P&O) et Incrémentation Décrémentation (IC) qui stagnent au premier pic trouvé même s'il est un pic représentant un point de puissance optimal local.

4.5 Conclusion :

Les résultats obtenus montrent l'intelligence de la technique MPPT appliquée face aux conditions PSC sous lesquelles notre système PV est posé, car le point de fonctionnement choisi comme point de puissance optimal est vraiment le point de puissance maximale global et ne pas le premier pic de puissance vu par la technique.

Ainsi, on peut conclut la précision de la technique lors de l'application du rapport cyclique D_{opt_g} , pour faire fonctionner le système photovoltaïque au point de puissance optimale (maximale) global, et cela pour récupérer le maximum de puissance possible à partir du champ photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire, était une simulation de la technique de recherche du point de puissance maximale (MPPT) basée sur l'algorithme d'optimisation par l'essaim des particules (PSO) dont l'étude est appliquée sur un champ photovoltaïque. On peut conclure l'importance de ce travail, à partir de l'importance de l'énergie solaire photovoltaïque qui a éliminé relativement pas mal d'inconvénient sur le terrain de production d'énergie électrique, comme la pollution et la complexité de technologie par rapport à la production d'électricité basant sur les sources fossiles (charbon, gaz, pétrole), et la nuisance par rapport aux autres énergies renouvelables comme l'énergie éolienne.

Le problème qui nous a rencontré en réalité, c'est bien l'intermittence de ce type d'énergie qui provoque un éclairage non uniforme, c'est-à-dire, les modules installés dans le même champ photovoltaïque n'étaient pas soumises sous les mêmes conditions d'irradiance, et cela a provoqué le phénomène des points chauds (Hot Spot) dans les modules partiellement éclairés apparaissaient au niveau des cellules ombrées.

Les résultats obtenus de ce travail nous a permis de conclure les points suivants :

- La puissance fournie par un module photovoltaïque est influée par les paramètres internes de ce dernier (son construction) et les paramètres externes surtout l'irradiance en W/m^2 , ou on a trouvé que pour une irradiance plus élevée la puissance produite s'augmente.
- Il est nécessaire d'installer des diodes en parallèle avec chaque module dans le champ ou chaque chaîne des modules (diode by-pass) pour assurer la sécurité du système photovoltaïque lors du fonctionnement sous les conditions d'ombrage partiel (PSC).
- Les conditions d'ombrage partiel (PSC) et l'installation des diodes by-pass provoquent l'apparition de plusieurs pics de puissance dans la caractéristique puissance en fonction de tension $P=f(V)$, ceux sont les points de puissance maximale locaux et le point de puissance maximale global.
- La technique MPPT basée sur l'algorithme d'optimisation par l'essaim des particules (PSO), garde le fonctionnement du système photovoltaïque contrôlé dans le point de puissance maximale global, malgré l'apparition d'autres pics de puissance, ce qui montre la

Conclusion générale

robustesse et la précision de cet algorithme méta heuristique utilisé pour appliquer la technique de recherche du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

Pour appliquer la méthode étudiée sans la programmée dans un microcontrôleur, on propose comme perspective la technique d'interface entre (MATLAB/Simulink et Arduino) , qui se base sur l'intégration du support du matériel (Arduino) dans la bibliothèque Simulink du MATLAB utilisé, pour exécuter la simulation réalisée dans ce mémoire sur la carte arduino , ou on utilisera des capteurs d'irradiance , température , courant et tension comme entrée pour le contrôleur de la carte arduino, aussi on utilisera la commande du gâchette de l'hacheur boost à partir une sortie de la carte.

Bibliographie

Bibliographie

[ELJ15] Zouhair ElJouad ,« Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », Physique, Université d'Angers, 2017, Thèse de doctorat.

[AST17] Astronomy and Physics, 2017. bbrc1b.gif (550×328) disponible sur <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/imgmod/bbrc1b.gif>, [Consulté le 10 /04/ 2020].

[SUD] <https://www.sudouest.fr/2018/09/18/eraole-l-avion-electrique-qui-regarde-l-avenir-5401709-4725.php>, [Consulté le 11/04/2020]

[NASA] :https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/sts088702024_feature.html [Consulté le 11/04/2020]

[HAD18] : Hadji Slimane, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque », Electronique, Université Ferhat Abbas Sétif 1,2018,Thèse de doctorat.

[livre] Livre disponible sur le site <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/11899/11899-energie-electrique-generation-photovoltaique-ensps.pdf>

[Consulté le 16/04/2020]

[BOU18] :Boutlilis Fatima, «Modélisation et simulation des sources de production décentralisée application à l'intégration d'un générateur PV à stockage *dans un réseau électrique* », Physique-Conversions Photovoltaïques, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,2017, Thèse de doctorat.

[MEK18] : Mekemeche Abdelkader ,« *Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes* »

[DOU18] : Doumane Radhia, « Modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation », Génie Mécanique -Systèmes Energétiques Avancés, Université M'hamed Bougara-BOUMERDES, 2018, Thèse de doctorat.

[RAY] : image disponible sur le site :

https://www.google.com/search?q=puissance+du+rayonnement+soleil+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjrxNv4o ToAhWF34UKHSSPBHcQ2cCegQIABAA&oq=puissance+du+rayonnement+soleil+&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECAAQOzoCCAA6BggAEAUQHjoGCAAQCBAeOgQIABAYUPKnAVij2AFg6doBaABwAHgBgAH2AYgB7R2SAQYxLjMwLjGYAQcGAAQgAQtd3Mtd2l6LWltZw&sclient=img&ei=2iecXuvvAoW lwSknPK4Bw#imgsrc=tqLgDiyiTw40AM, [consulté le 19/04/2020]

[KIH19] : Kihal Abbes, « Advanced Approach for the Optimization of a Grid-Tied Photovoltaic System », Electronique et commande industrielles, Université Ferhat Abbas Setif1, Thèse de doctorat, 2019.

[THE & TOM19] : Tommy Andy, THEUBOU TAMEGHE « Contribution À La Mise En Œuvre Et À La Commande D'un Micro réseau De Cogénération Modulaire (Injection De Puissance Et Stabilisation De Fréquence) », Université du Québec à Chicoutimi, Thèse de doctorat, 2019.

[ATT17] : Attou Amin, « Commande de la machine asynchrone dédiée à l'énergie photovoltaïque », Commande des actionneurs électrique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Thèse de doctorat, 2017.

[TEL17] : Mohammed Telidjane, « Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationnarité pour le diagnostic », Traitement de signal, L'UNIVERSITE DE LYON opérée au sein de l'université de Jean Monnet Saint-Etienne, Thèse de doctorat, 2017.

[MID19] : Mida Dris, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Électrique Hybride Éolien – Photovoltaïque », Réseaux électriques, Université Mohamed Khider-Biskra, Thèse de doctorat, 2019.

[PEI16] : Peio Loubière, « Amélioration des méta-heuristiques d'optimisation à l'aide de l'analyse de sensibilité », Mathématique et sciences et technologie de l'Information et de la Communication (MSTIC), L'université Paris-Est, Thèse de doctorat, 2016.

[HOS19] : Hossam Hassan Ammar, Ahmad Taher Azar, Raafat Shalaby, M. I. Mahmoud « Metaheuristic Optimization of Fractional Order Incremental Conductance (FO-INC) Maximum Power Point Tracking (MPPT) », 2019.

Bibliographie

[Art2020] : Ali M. Eltamaly , M. S. Al-Saud , A. G. Abo-Khalil ,« Performance Improvement of PV Systems Maximum Power Point Tracker Based on a Scanning PSO Particle Strategy », 2020.