REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES

Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

ABBAS ABD EL DJALIL

KACIMI DHIA EL HAK

Filière : électrotechnique

Spécialité : machine électrique

Contribution à la Modélisation, Commande et Simulation d'un système Photovoltaïque autonome

---

Mme. MZIOU	Nassima	Professeur	Université M'hamed bougara de Boumerdes	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCA	Université M'hamed bougara de Boumerdes	Examinateur
Mme. MADACI	Bouthaina	MCB	Université M'hamed bougara de Boumerdes	Rapporteur

Soutenu le 03/07/2024devant le jury :

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

À la femme qui m'a mis au monde, symbole de tendresse, à la femme qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma mère.

À mon père qui m'a encouragé, aidé et protégé tout au long de ma vie.

À mon frère et sœurs.

Àtoutes mes amis.

À R.Sidali

À G.Tarek

ÀO.Othmane

ÀB.A madjid

À tous ceux qui me sont chers.

À tous ceux qui m'aiment.

À tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

~~~~~~*A.Abd el djalil*

À la femme qui m'a mis au monde, symbole de tendresse, à la femme qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma mère.

Àtoutes mes amis.

À R.Sidali

À G.Tarek

À tous ceux qui me sont chers.

À tous ceux qui m'aiment.

À tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

~~~~~~**K.***Dhia el hak*

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord ***ALLAH*** *le tout puissant pour nous avoir donné lavolonté,lasantéetlapatience.*

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre promoteur, Mme.**MADACI B.**, *qui nous a professionnellement encadré tout au long de la réalisation de ce travail*

*Nos remerciements vont également aux membres de jury Mme.****MZIOU N.*** ***et****Mr.****HAMEL M.****qui ont accepté d'évaluer notre mémoire*

Nous tenons également à remercier tous nos ***enseignants*** *qui nous ont aidés à atteindre le niveau que nous avons atteint aujourd'hui.*

Nous ne terminerons pas sans avoir exprimé des remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Dédicace ..... *i*

Remerciements ..... *ii*

Table des matières ..... *iii*

Résumé ..... *x*

Introduction générale *1*

Chapitre I :Etat d'art de Système Photovoltaïque

I.1.Introduction **3**

I.2 Historique **3**

I.3 Terminologie **4**

I.4 Génération de l'énergie solaire **4**

I.4.1 Rayonnement solaire **4**

I.5 Cellule photovoltaïque **5**

I.5.1 Principe de fonctionnement **5**

I.5.2 Différents types de cellule photovoltaïque **6**

I.6 Générateur photovoltaïque **7**

I.7 Types des systèmes photovoltaïque **9**

I.7.1 Système photovoltaïque autonome **9**

I.7.2 Système photovoltaïque connecté au réseau **10**

I.8 Système de stockage **11**

I.8.2 Caractéristiques des batteries **12**

I.9 Potentiel solaire en Algérie **13**

I.10 Avantages et inconvénients 13

I.11 Conclusion 14

Chapitre II : Modélisation et Commande d'un système Photovoltaïque

II.1 Introduction 15

II.2 Modélisation du système Photovoltaïque 15

II.2.1 Modélisation du générateur PV 15

II.3 Modélisation du convertisseur DC-DC 18

II.3.1 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) [26] 18

II.4 Description des Contrôleurs MPPT 21

II.5 Critères de choix des algorithmes MPPT 21

II.6 Algorithmes MPPT pour le générateur photovoltaïque 22

II.6.1 Algorithme de Perturbation et Observation (P&O) 22

II.6.2 Algorithme Conductance Incrémentale (Inc-Cond) 23

II.6.3 Conception du contrôleur MPPT flou 25

II.7 Conclusion 28

Chapitre III : Résultats de Simulation

III.1 Introduction 29

III.2 Réalisation du panneau PV sur Matlab/simulink 29

III.2.1 Blocs diagramme des fonctions de module PV sous Matlab/Simulink : 29

III.3 Résultat de simulation : 32

III.3.1 Pour un éclairement G et une température T constante : 32

III.3.2 Pour un éclairement G et une température T variable 33

III.4Tests d'efficacité des algorithmes MPPT 35

III.4.1 Résultatsde simulation sous lesconditionsstandards : 35

III.5 Résultatsde simulations sousunevariationd'irradiation : 36

III.6 Résultats de simulations sous une variation de la température 37

III.7 Conclusion 38

Annexe A

A. 1. AlgorithmePerturbation et Observation(P&O) sous MATLAB 40

A.2. AlgorithmeMPPT Incrémentale Conductance sous Matlab 41

A.3. Simulationdel'algorithme MPPT basée sur la Logique flou 43

Références bibliographies*.....*44

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Composantes du rayonnement solaire au sol....4
Figure I.2 : Cellule photovoltaïque....5
Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une photopile....5
Figure I.4 : Composantes d'un générateur photovoltaïque....7
Figure I.5 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques....8
Figure I.6 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques 8
Figure II.7 : Systèmes photovoltaïques autonome avec stockage....9
Figure II.8 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique....10
Figure II.9 : Systèmes autonomes sans stockage....10
Figure II.10 : Différents types des batteries....11
Figure II.11 : Potentiel solaire en Algérie....13

Chapitre II :

Figure II.1 : Eléments constituants le système PV....25
Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule PV à une diode....25
Figure II.3 : Tension de l'interrupteur K (transistor)....18
Figure II.4 : Schéma de principe d'un hacheur *Buck-Boost*....18
Figure II.5 : Circuit équivalent d'un Buck-Boost quand l'interrupteur est fermé....19
Figure II.6 : Circuit équivalent d'un Buck-Boost quand l'interrupteur K est Ouvert....19
Figure II.7 : système PV avec le contrôleur MPPT....21
Figure II.8 : Organigramme de l'algorithme P&O....23
Figure II.9 : Technique de l'algorithme Inc-Cond....24
Figure II.10 : Organigramme de la méthode d'Inc-Cond....25
Figure II.11 : Structure de base du contrôleur flou MPPT....26
Figure II.12 : Fonction d'appartenances des entrées : E, CE et de la sortie ΔD....27

Chapitre III :

Figure III.1 : Blocs diagramme de photo-courant I_{ph}....30
Figure III.2 : Blocs diagramme de courant de saturation I_o....30
Figure III.3 : Blocs diagramme de Courant de shunt I_p....30
Figure III.4 : Blocs diagramme de courant de fuite (I_{rs} ou I_{on})....31
Figure III.5 : Blocs diagramme de courant I....31

Figure III.6 : Schéma de simulation d'un module PV 31
Figure III.7 : Caractéristique I-V d'un module PV à 25°C et 1000 (W/m2) 32
Figure III.8 : Caractéristique P-V d'un module PV à 25°C et 1000 (W/m2) 32
Figure III.9 : Influencedel'irradiationsurI(V)et P(V) 33
Figure III.10 : Influencede latempératuresurlescaractéristiquesI(V)etP(V) 34
Figure III.11 : Puissance de la sortie du système PV 35
Figure III.12 : Zoom de la puissance de la sortie du système PV. 35
Figure III.13 : Figure IV.13 : Profil de l'irradiation.....36
Figure III.14 : Puissance de la sortie du système PV sous une variation d'irradiation 36
Figure III.15 : Zoom de la puissance de la sortie du système PV 36
Figure III.16 : Profil de la température.....38
Figure III.17 : Puissance de la sortie du système PV dans le cas de changement de température 37
Figure III.18 : Zoom de la puissance de la sortie du système PV 37

Liste des Tableaux

Chapitre I :

TableauII.1 : Différents types de cellulesphotovoltaïques 6

Chapitre II :

TableauII.1 : Critèresde choix des algorithmes MPPT.....22
Tableau II.2 : Table d'inférence du MPPT flou.....28

Chapitre IV :

TableauIII.1 : Paramètres du panneau PV.....29

Abréviations et Acronymes :

PPM	Point de puissance maximale
MPPT	poursuite de point de puissance maximal
P&O	perturbation et observation
IncCond	Incrémentale Conductance
DC/DC	Hacheur Courant Continu/Courant Continu
GPV	générateur photovoltaïque
ΔE	Changement d'erreur
n	Facteur de non idéalité de la jonction
φ	L'amplitude
ER	énergie renouvelable
MOSFET	The metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
Voc	la tension en circuit ouvert
Icc	Le courant de court-circuit
Ki	Coefficient de température de courant de court-circuit
q	Charge électrique élémentaire
K	La constante de Boltzmann
Ego	énergie de gap de cellule
Rp	Résistance shunt
Rs	Résistance série
T	Température
Tn	Température de référence
Np	Nombre de cellules en parallèle
Ns	Nombre de cellules en série
Gn	Irradiation de référence
G	Irradiation
NG	Négative grande
NP	Négative petite
ZE	Zéro
PP	Positive petite
PG	Positive grande
Ve	La tension d'entrée
FLC	Fuzzy Logic Controller
PV	Photovoltaïque

Notation et Symboles :

Wc	Watt- crête
C	Coulome
K	Kelvin
Ω	ohm

A	Ampère
V	Volt
J	Joule
W	Watt
m^2	mètre carré
eV	Électron Volt

ملخص

دراستنا تناولت التحكم بتقنية MPPT (تتبع نقطة الطاقة القصوى) في نظام كهروضوئي بهدف تحسين إنتاج الطاقة الشمسية. قمنا بتحليل مكونات النظام الكهروضوئي بالتفصيل، مثل الخلايا الشمسية ومحولات التيار المستمر(DC-DC) ، وسلوكها تجاه التغيرات البيئية. تم استكشاف ثلاث خوارزمياتMPPT (الاضطراب والمراقبة، زيادة التوصيل، والمنطق الضبابي) ومحاكاتها وتقييمها. أظهرت النتائج أن كل خوارزمية تمتلك مزايا محددة لتحسين الكفاءة الطاقية، مما يؤكد متانتها وفعاليتها في ظروف مناخية مختلفة.

الكلمات المفتاحية:تقنيةMPPT،نظام كهروضوئي ,الخلايا الشمسية،محولات التيار المستمر(DC-DC)، الاضطراب والمراقبة، زيادة التوصيل، والمنطقالضبابي .

Résumé

Notre travail a étudié la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) d'un système photovoltaïque, visant à optimiser la production d'énergie solaire. Nous avons analysé en détail les composants du système PV, tels que les cellules solaires et les convertisseurs DC-DC, ainsi que leurs comportements face aux variations environnementales. Trois algorithmes MPPT (Perturbation et Observation, Incrément de Conductance, et Logique Floue) ont été explorés, simulés et évalués. Les résultats ont montré que chaque algorithme possède des avantages spécifiques pour maximiser l'efficacité énergétique, validant leur robustesse et efficacité dans différentes conditions climatiques.

Mots-clés :Commande MPPT, systèmephotovoltaïque,ModulePV,buck-boost, Perturbation et Observation, Incrément de Conductance, Logique Floue

---

Abstract

Our study focused on the MPPT (Maximum Power Point Tracking) control of a photovoltaic system to optimize solar energy production. We thoroughly analyzed the components of the PV system, such as solar cells and DC-DC converters, and their behavior under environmental changes. Three MPPT algorithms (Perturb and Observe, Incremental Conductance, and Fuzzy Logic) were explored, simulated, and evaluated. The results demonstrated that each algorithm has specific advantages in enhancing energy efficiency, validating their robustness and effectiveness under various climatic conditions.

Keywords: MPPT control, photovoltaic system, buck-boost, P&O, Cond-Inc, FLC

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, l'électricité est la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Avant de l'exploité on doit étudier sa production. Les sources d'énergies fossiles telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel représentent plus des trois-quarts de l'énergie mondiale consommée pour la production d'électricité [1]. Cependant, ces sources vouées à se tarir au cours des prochaines décennies. Elles sont à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO_2, cause principale de l'augmentation de l'effet de serre. Face à ces problèmes, l'avenir de la production d'électricité est donc résolument tourné vers l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable (ER).A la différence des énergies fossiles, les sources ER en particulier l'énergie solaire,qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Cependant, ces sources restent des natures stochastiques ou tributaires des conditions météorologiques [2]. Dans ce contexte, l'étude s'intéresse à l'énergie solaire photovoltaïque (PV)qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé.

Pour augmenter le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation PV, et extrait le maximum de la puissance électrique issue du générateur PV, quelles que soient les conditions climatiques c'est-à-dire les variations de l'éclairement et de la température. Des techniques MPPT d'optimisations, souvent utilisés.La littérature est riche par diverses techniques MPPT, qui sont varient selon leur complexité, topologies…. [3]. Toutefois, l'objectif de ces techniques est d'optimiser l'efficacité du système PV.

Dans le présent travail et afin d'optimiser l'énergie du système PV, trois algorithmes MPPT sont développés et exploités, deux méthodes conventionnelles : la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (IncCond) et une méthodeavancée :MPPT floue (FLC).Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global PV sous des conditions de fonctionnement variables.

Les objectifs du présent travail, en plus de l'approfondissement de nos connaissances sur les enjeux des modélisations, simulations et commandes d'un système PV autonome pour la production d'énergie électrique, sont multiples, à savoir :

- Approfondir nos connaissances sur ce thème de recherche ;

- Maitrise de la commande et la simulation des systèmes PV ;
- Optimisation des sources PV à travers des commandes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ;
- Trouver des solutions pour les problèmes rencontrés.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons organisé la mémoire en quatre chapitres :

Le **premier**chapitre donne un état d'art sur les systèmesphotovoltaïques ;

Le **deuxième chapitre** représente la modélisation détailléede tous les composants de système PV. Il commence par la modélisationde l'élément de base d'un GPVc'est la cellule PV à une seule diode, voir aussi la modélisation d'un module PV afin de réaliser lamodélisation d'un GPV.En fince chapitre terminer parla modélisation d'un hacheur de type Buck-Boost ;

Le **troisième** chapitre expose l'optimisation d'un système photovoltaïque par des contrôleurs MPPT, où représententtrois technique :P&O, IncCond et FLC ;

Le **quatrième** chapitre présente les résultats de simulation du comportement dusystème PV, face aux variations climatiques.

Ce travail est clôturé par une conclusion générale et des perspectives qui peuvent des améliorations et continuation de ce mémoire.

Chapitre I :Etat d’art deSystème Photovoltaïque

I.1.Introduction

Le soleil est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'humanité pour les besoins alimentaires, domestiques et industriels. La technologie photovoltaïque permet de transformer une partie de cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz [4]. En plus, l'énergie solaire est une source énergétique gratuite, un gisement inépuisable, avec grandes variétés d'applications et très pratique, particulièrement pour le développement des régions isolées [5].L'Algérie, avec son important potentiel solaire et ses nombreuses heures d'ensoleillement, est bien placée afin d'exploiter cette énergie. Les initiatives et projets en cours montrent l'engagement du pays à intégrer les énergies renouvelables dans son mix énergétique.

Ce chapitre explore le principe de la technologie photovoltaïque, les différents types de cellules photovoltaïques, ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.

I.2 Historique

La notion des systèmes photovoltaïques est apparue depuis plus d'un demi-siècle. Parmi les dates importantes dans l'histoire du PV on peut citer [6] :

- 1839 : Le physicien français **Edmond Becquerel** découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est 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. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains **Chapin, Pearson** et **Prince**, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 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, qui est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

I.3 Terminologie

Le terme « photovoltaïque », est composé de deux mots :« **Photo** » : un mot grec signifiant lumière, « **Voltaïque** » : qui vient de « volt » le nom du physicien Italien **Alessandro Volta** (1745-1827), qui a inventé vers 1800 la première pile électrique, appelée pile voltaïque.

I.4 Génération de l'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du **rayonnement solaire** en **énergie électrique continu**. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une **cellule dite photovoltaïque** basée sur un phénomène physique appelé **effet photovoltaïque,** qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [7].

I.4.1 Rayonnement solaire

Le **rayonnement solaire** est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Principalement, les rayonnements solaires exploités par latechnologie PV sont :Ultraviolet, infrarouge et visible. Ils peuvent être divisés en trois types comme montre La**FigureI.1** :

- **RayonnementDirect** : reçu directement du soleil au sol ;
- **RayonnementDiffus** : provenant de l'atmosphère ;
- **RayonnementRéfléchi** : provenant du sol ;

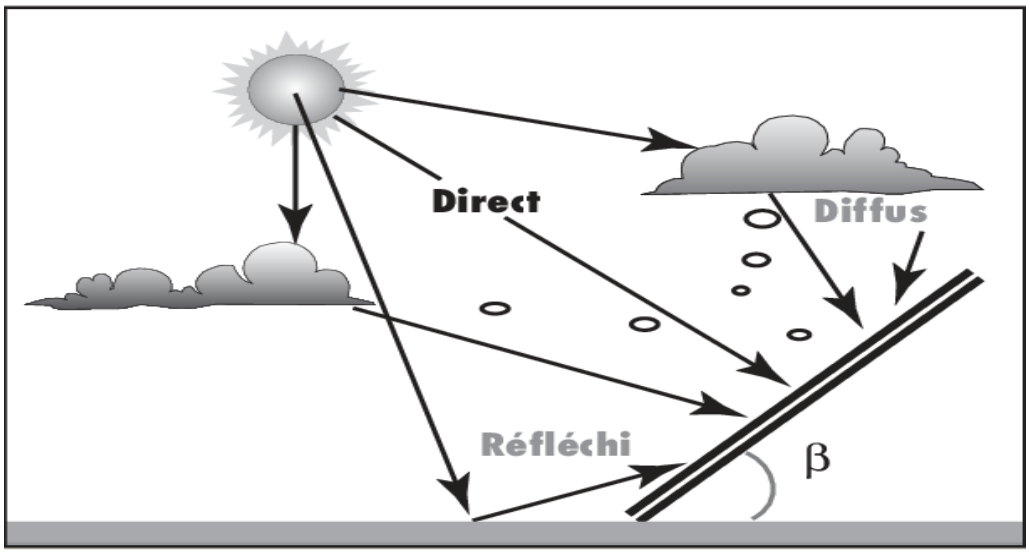


Figure I.1 : Composantes du rayonnement solaire au sol.

I.5 Cellule photovoltaïque

Au cœur de la révolution énergétiquephotovoltaïque se trouve la cellule photovoltaïque,Une cellule photovoltaïque ou photopile, unité de base d'un système photovoltaïque est un composant électronique semi-conducteur qui, quand elle est exposée à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est l'origine du phénomène.

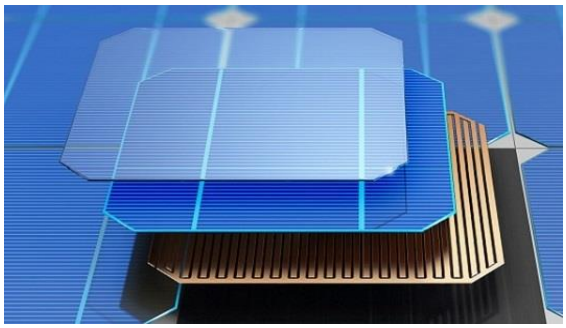


Figure I.2 : Cellule photovoltaïque

I.5.1 Principe de fonctionnement

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[8].Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction *PN* de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges *N*) et des trous (charges *P*), ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches[9] [10]. La**Figure I.3** montre le principe defonctionnement d'une cellule PV.

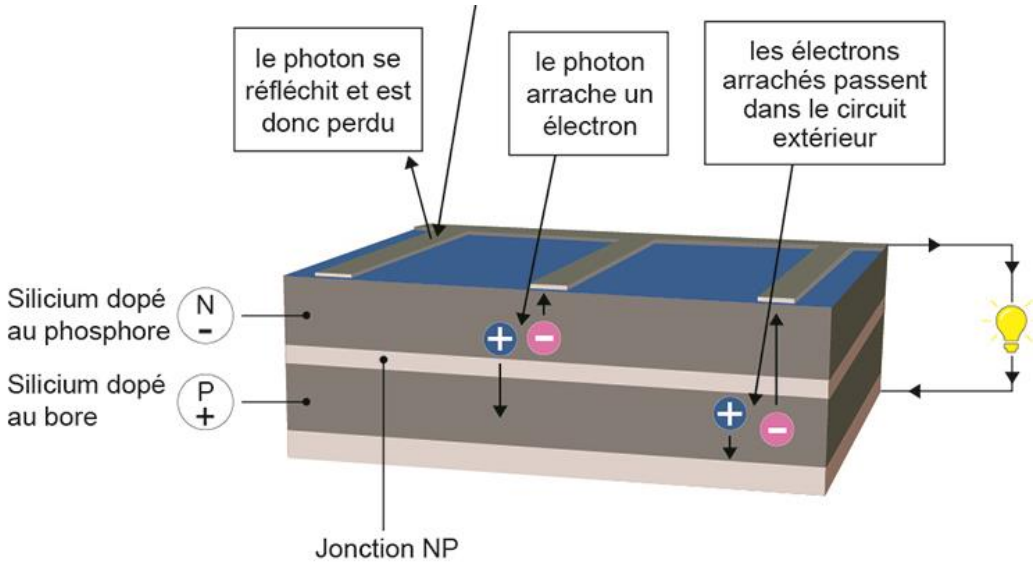
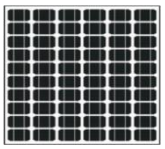
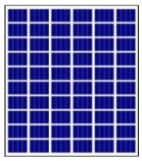
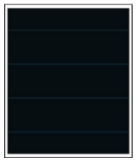


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une photopile

I.5.2 Différents types de cellule photovoltaïque

Principalement, Il existe trois types de cellules photovoltaïques, cellules monocristallines, poly cristallines et amorphes. Chaque type est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres [11].Le**Tableau I.1**représente les principaux types de cellules PV.

Tableau I.1 : Différents types de cellules photovoltaïques.

Technologie	Rendement typique (%)	Duré Devie	Caractéristique	Domaines d'application
 **Silicium monocristallin**	12 à 17 %	20 à 30 ans	▪ Coût plus élevé que les autres types de cellules PV ; ▪ Meilleur rendement par apport les autres types de cellules PV.	Alimenter une habitation autonome ou connecter au réseau électrique.
 **Silicium poly cristallin**	11 à 13 %	20 à 30 ans	▪ Coût un peu plus faible que la cellule monocristalline ; ▪ Rendement moyen.	Installations : domestiques, industrielles et agricoles
 **Silicium Amorphe**	5 à 10 %	10 à 20 ans	▪ Un peu moins cher que les autres cellules PV. ▪ Rendement faible en plein soleil.	Alimenter les appareils de faible puissance comme les montres solaires, les éclairages de jardin et les calculatrices solaires.

I.6 Générateur photovoltaïque

La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm^2 et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de **1** à **3 W** avec une tension de moins d'un volt, entre **0.3** et **0.7 V**. Afin de produire une tension et une puissance adéquate, les cellules sont assemblées entre elles en série et/ou en parallèle pour former ce qu'on appelle '**un module'**. L'association de ces modules en série et/ou en parallèle constituent les panneaux PV, eux-mêmes sont interconnectés pour former un **générateur PV**[12]. Le générateur PV (**GPV**) est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée. La**Figure I.4** donne les composantes d'un générateur photovoltaïque [13].

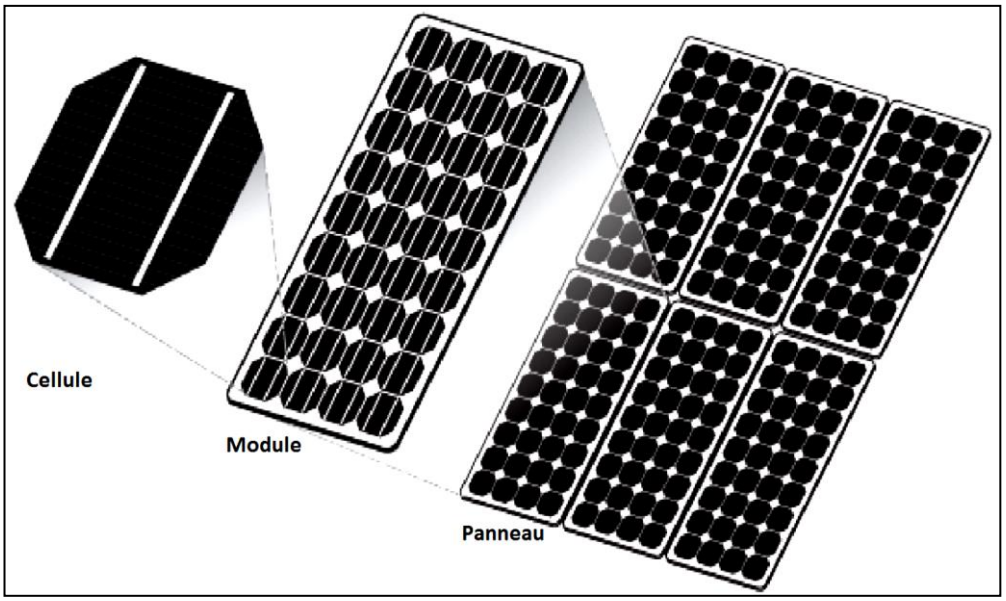


Figure I.4 : Composantes d'un générateur photovoltaïque.

Dans un groupement des cellules identiques en série, le courant reste le même mais la tension augmente proportionnellement avec le nombre de cellules connecté en série. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules PV, connectées en série afin d'obtenir une tension de 12 V.La **Figure I-5** montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série *ns* cellules identiques.

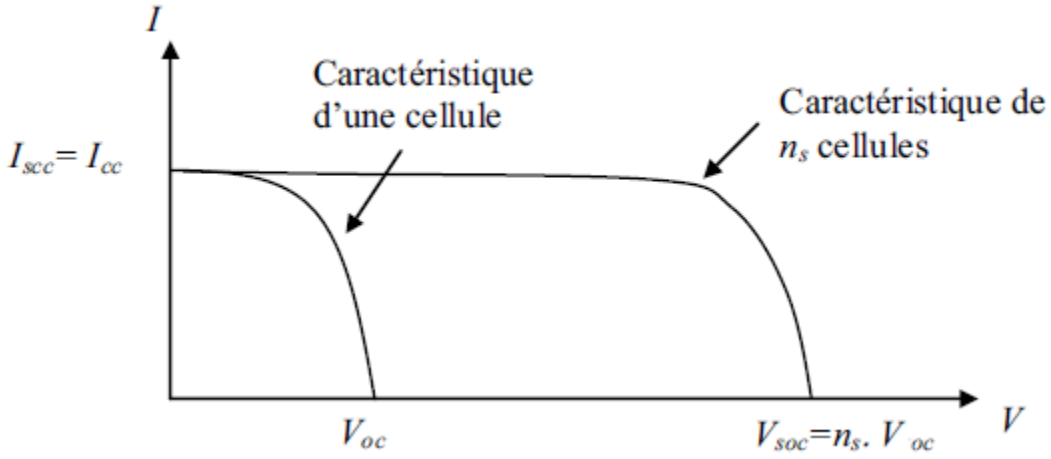


Figure I.5 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques

Tandis que, dans un groupement de plusieurs cellules en parallèle,les cellules PV sont soumises à la même tension, mais l'intensité du courant électrique augmente proportionnellement avec le nombre de cellules PV connecté en parallèle [13]. La**Figure I.6** montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles *np*cellules identiques.

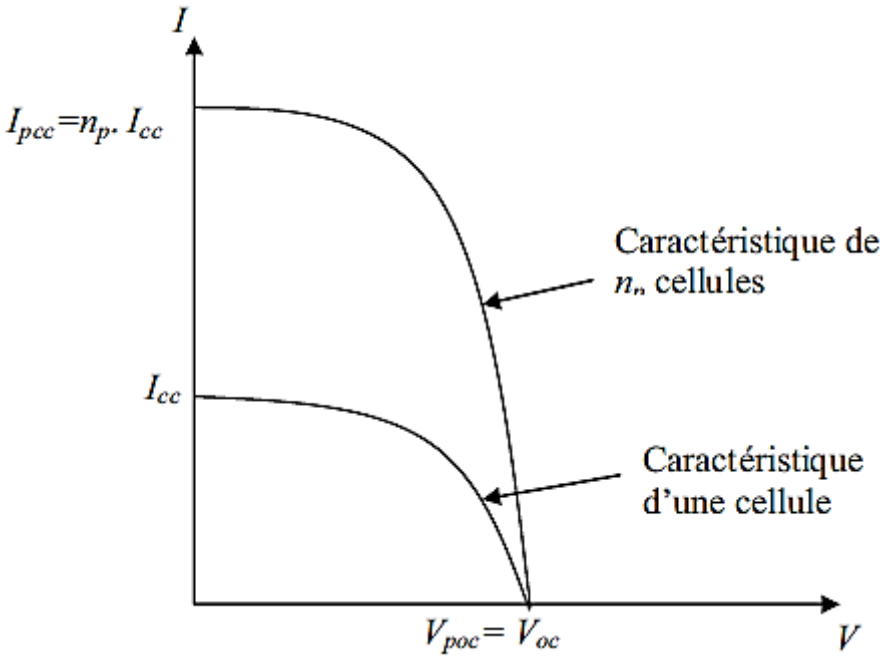


Figure I.6 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques

I.7 Types des systèmes photovoltaïque

En fonction du service et des applications recherchés les systèmes photovoltaïques peuvent être classifiés comme suit :

I.7.1 Système photovoltaïque autonome

Les systèmes PV autonomes fournissent directement l'énergie électrique sans être connecté au réseau électrique[14], on distingue :

a) Système photovoltaïque autonome avec stockage

C'est le système photovoltaïque le plus commun.L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Le composant de stockage permet d'emmagasiner del'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent(pendant la nuit). Souvent, utilisés pour répondre aux besoins des sites qui sont difficilement accessibles ou n'ont pas d'accès à un réseau électrique, par exemple : refuges de montagne, iles, villages isolés…. Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus,les batteries électrochimiques [15].La**figure I.7** représente un système PV autonome avec stockage

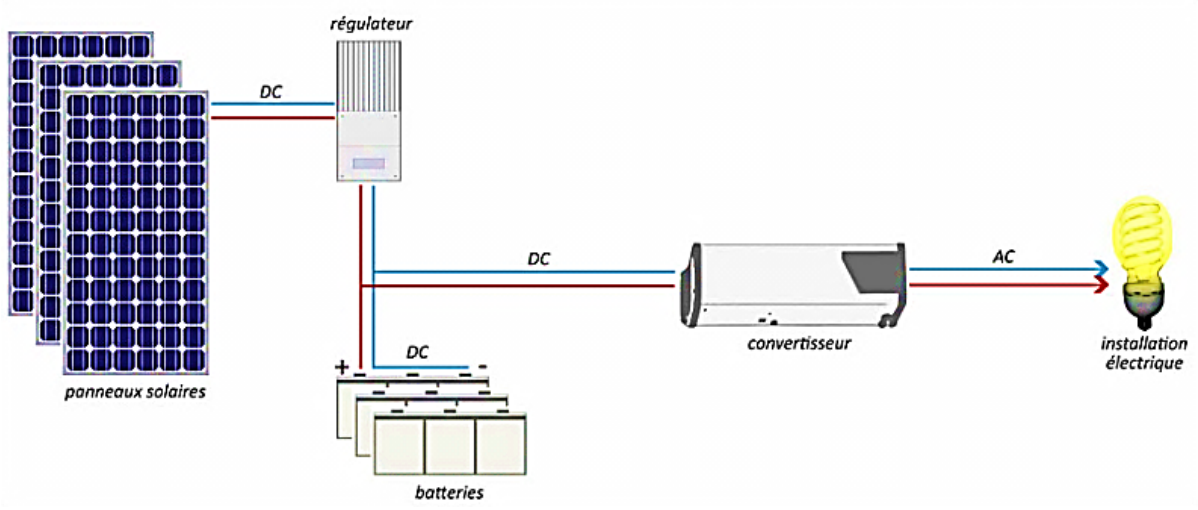


Figure I.7 : Systèmesphotovoltaïques autonome avec stockage

b) Systèmes autonomes sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage, soit quel'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de la lumièrepar exemple la pompe à eau (le réservoir d'eau sert de stockage)[16], cela signifie que ces systèmes sont directement dépendants de la lumière solaire pour produire de l'électricité en temps réel. La**Figure I.8** indique un système PV autonome sans stockage.

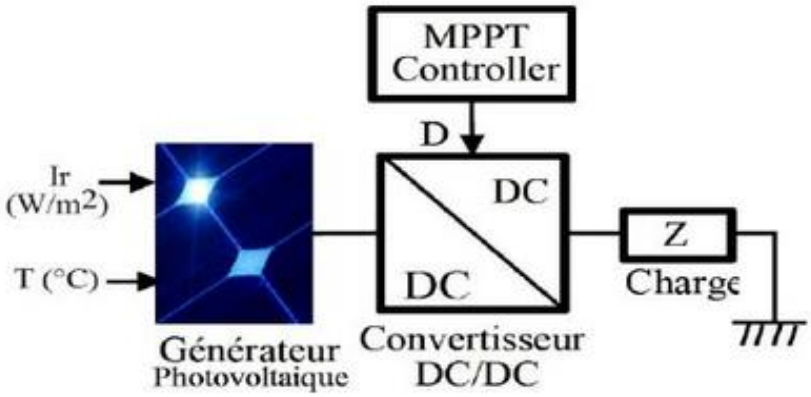


Figure I.8 : Systèmes autonomes sans stockage

I.7.2 Système photovoltaïque connecté au réseau

Dans ce type,le système photovoltaïque est couplé au réseau électrique par le convertisseur statique 'l'onduleur' pour assurer la conversion de la puissance Continue/Alternative (DC/AC). L'énergie produite par le système PV est consommée immédiatementpar le consommateur, et le surplusd'énergie produite est injecté vers le réseauélectrique, qui est agi comme un système de stockage d'énergie [17].Par conséquence, ce type de système n'a pas exigé d'utilisé le système de stockage puisque dans le cas de l'incapacité du système PV pour assurer l'exigence de la charge le réseau intervenu pour garantir l'énergie nécessaire.La**Figure I.9** montre un système PV connecté au réseau électrique.

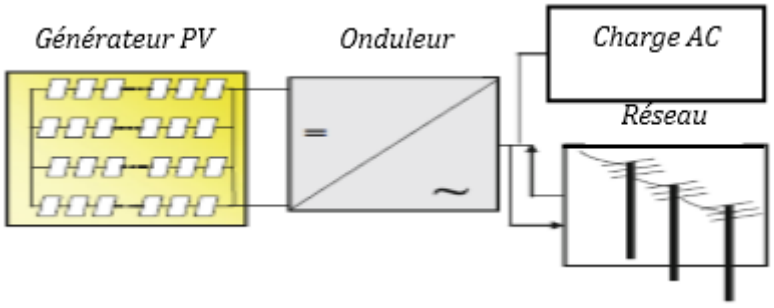


Figure I.9 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

I.8 Système de stockage

Le caractère intermittent des sources d'ER est la cause que les systèmes de stockage jouent un rôle important dans le développement de l'énergie dans les années à venir. Ce mode de stockage nécessite un système de contrôle de la charge et de la décharge des batteries afin d'éviter d'endommager les batteries par des décharges profondes ou des surcharges.
Le stockage de l'énergie est une action qui permet de placer une quantité d'énergie dans un lieu donné afin de l'utiliser ultérieurement. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée [18].

Actuellement, les technologies les plus émergentes dans les systèmes PV sont les technologies électrochimiques(sont divisées en stockage à base d'hydrogène, batteries à air et stockage d'énergie par batterie) ; en particulier les systèmes de stockage d'énergie à batterie. Il peut être distingué en batteries au :plomb-acide, nickel-cadmium et lithium-ion, en raison de leur faible coût, de plus ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique, sans émission de polluants. La **FigureI.10** donne les différents types des batteries [19].

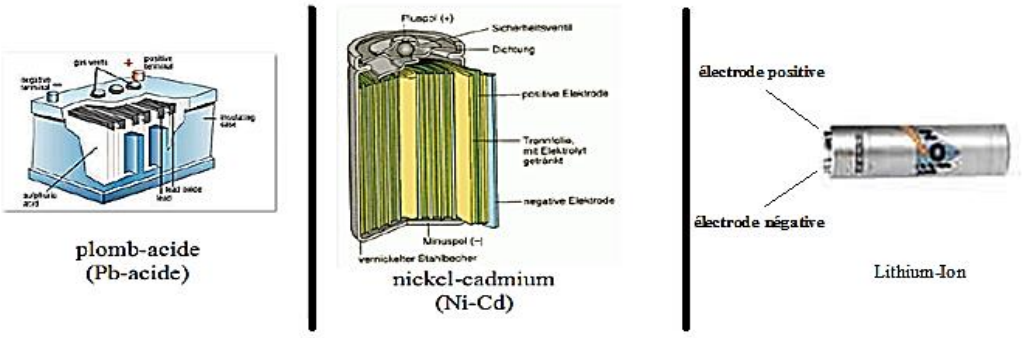


Figure I.10 : Différents types des batteries

a) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide)

Elle présente plusieurs avantages, c'est la moins chère par rapport à d'autres technologies, leur autodécharge est faible, elle est presque entièrement recyclable (plus de 90%). Cependant, ce type de batteries estsensible aux décharges trop profondes conduisant à une diminution importante de leur durée de vie.

b) Batterie au lithium-Ion (li-Ion)

Les performances de ce type sont bien meilleures que les autres. L'autodécharge est très faible (1 % par mois), la durée de vie élevée, cependant son prix est beaucoup plus élevé à cause de

leur fabrication qui nécessite un investissement supérieur que celui des batteries au Plomb. En plus la batterie lithium contenant un pourcentage élevé de métaux lourds et dangereux, en effet leur recyclage est compliqué et n'a pas atteint la maturité.

c) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Elle est robuste, mais souffre d'un coût élevé, une autodécharge assez rapide (20% par mois) de plus leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant.

I.8.2 Caractéristiques des batteries

Les paramètres techniques les plus représentatifs identifiés d'un accumulateur sont les suivants [20] :

- **Capacité nominale :**c'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah).
- **Tension d'utilisation :** C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **Durée de vie (nombre de cycle) :**La durée de vie d'une batterie est une caractéristique essentielle pour son utilisation. Elle définit la capacité d'un élément de stockage à fournir de manière répétée son énergie après recharge, mesurée en nombre de cycles ou en années (un cycle comprenant une charge et une décharge) ;
- **Profondeur de décharge** : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.
- **Autodécharge :** définit l'énergie perdue par un système de stockage pendant le temps de non-utilisation. Ce paramètre est mesuré par la relation entre le l'énergie perdue pendant une certaine période de temps (heure, jour où mois) et la capacité énergétique du dispositif de stockage.
- **Rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- **Etat de charge (SOC)** : c'est la quantité d'énergie disponible diviséepar la capacité nominale de la batterie. Si SOC = 1,la batterie est chargé et quand : SOC = 0, la batterie est vide.

I.9Potentiel solaire en Algérie

Géographiquement, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen.La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures par an (Sahara). La **FigureI.11** représente lacarte des irradiations solaires de l'Algérie [21].

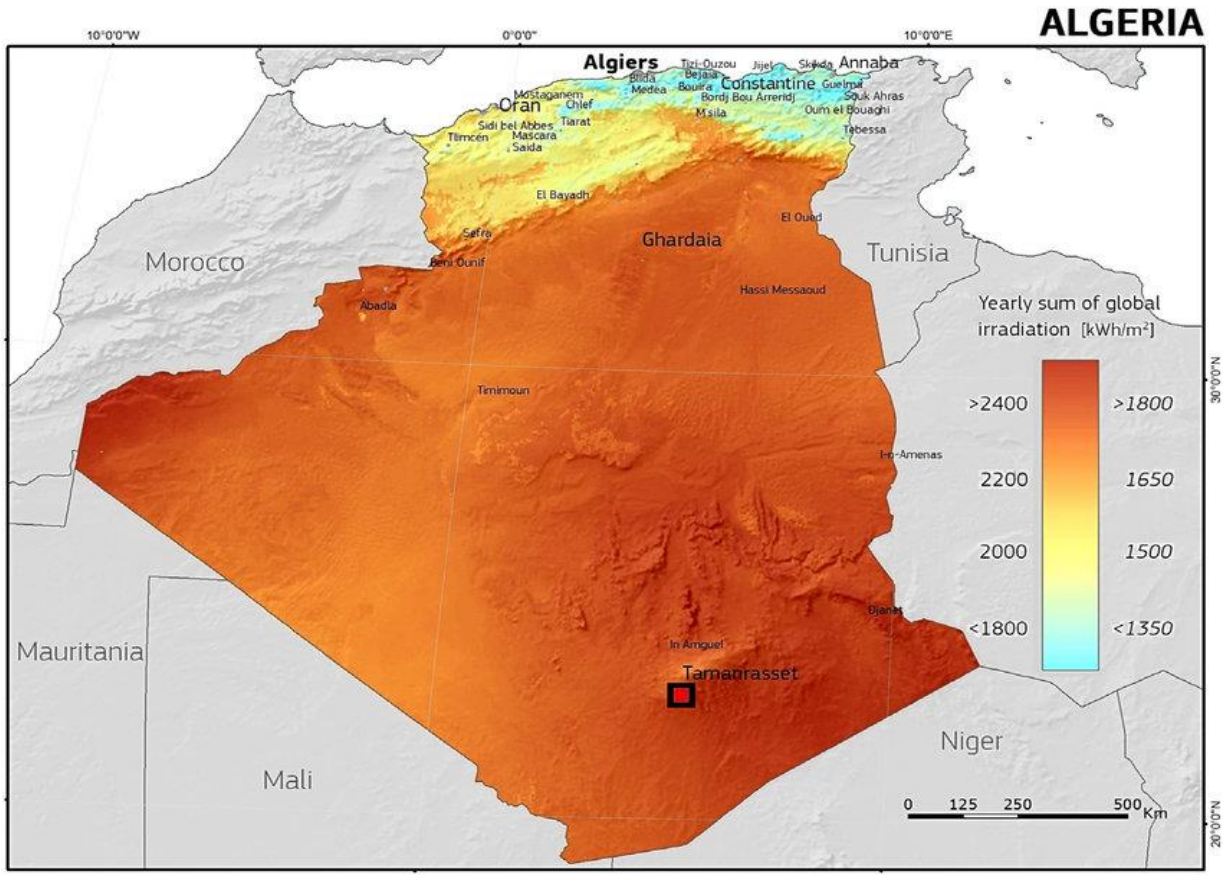


Figure I.11 : Potentiel solaire en Algérie

I.10 Avantages et inconvénients

Le système photovoltaïque a beaucoup d'avantages [22] **:**

- Haute fiabilité **:** Les systèmes PV sont fiables car ils n'ont pas de pièces mobiles. Cela les rend idéaux pour des applications dans des régions isolées.
- Modularité : Les panneaux solaires sont modulaires, ce qui permet une installation simple et adaptable à divers besoins énergétiques. Ils peuvent être dimensionnés pour des applications allant de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts.
- Faibles coûts de fonctionnement : les panneaux solaires demandent très peu d'entretien, il n'estpasbesoinde combustible, de transport, ni de personnel hautement spécialisé.

- Écologique : Les technologies photovoltaïques sont non polluantes, silencieuses et n'entraînent aucune perturbation environnementale majeure

Néanmoins, les systèmes photovoltaïques présentent aussi quelques inconvénients :

- Coût élevé de fabrication : La fabrication des modules PV nécessite une technologie avancée et des investissements élevés ;
- Rendement de conversion faible : Le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité est relativement faible, généralement de 10-15 % ;
- Tributaire aux conditions météorologiques : La performance des systèmes PV dépend des conditions météorologiques, ce qui peut affecter leur efficacité ;
- Coût du stockage : Lorsqu'il est nécessaire de stocker l'énergie sous forme chimique (batteries), le coût du système augmente ;
- Taille des installations : L'énergie solaire n'est pas compétitive lorsqu'il s'agit d'une production importante d'énergie, parce qu'elle nécessite une grandes surfaces.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principaux concepts liés à l'énergie solaire et à la composition d'un système photovoltaïque. Nous avons étudié en profondeur le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que les technologies utilisées et les différents types de cellules photovoltaïques disponibles. De plus, nous avons examiné les diverses technologies de stockage d'énergie associées à ces systèmes.

Ce chapitre est considéré comme une introduction détaillée de notre travail, afin d'avoir les aspects généraux nécessaires pour pouvoir entamer à la modélisation des composants du système PV pour passer par la suite à la commande MPPT d'un système PV.

Chapitre II : Modélisation et Commande d’un système Photovoltaïque

II.1 Introduction

Afin de connaître le comportement du système PV, il est nécessaire de passer par la modélisation. Ce chapitre explore la modélisation d'un système photovoltaïque à l'aide d'un ensemble d'équations mathématiques précises pour analyser et optimiser les performances des systèmes PV. Pour assurer que le fonctionnement d'un générateur PV est à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking : poursuite du point de puissance maximale) sont souvent utilisés. Par définition, le contrôleur MPPT d'un système PV est un mécanisme d'optimisation qui consiste à rechercher le point de fonctionnement maximal du générateur PV et à le faire fonctionner dans le voisinage de ce point, en variant automatiquement le rapport cyclique *D* d'un convertisseur statique (DC-DC) [27].

II.2Modélisation du système Photovoltaïque

Le système PV proposé dans ce travail est constitué par un générateur photovoltaïque (GPV), un hacheur *buck-boost* afin d'alimenter une charge continue, comme montre la figure ci-dessus.

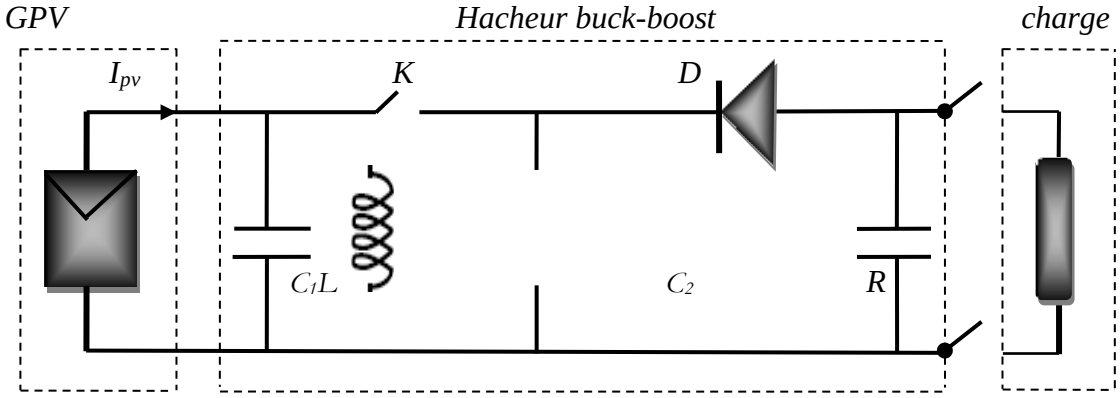


Figure II.1 : Eléments constituants le système PV

Dans ce qui suit, nous présentons les modèles mathématiques bien détaillés de chacun de ces différents éléments constituants le système PV.

II.2.1 Modélisation du générateur PV

Elément de base constituant le générateur photovoltaïque, c'est la cellule photovoltaïque, en conséquence, voyant d'abord le modèle mathématique de cette dernière.

II.2.1.1 Modèle d'une cellule PV à une seule diode

De nombreux modèles mathématiques, ont été développés dans la littérature pour identifier le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque [5]. Nous avons adopté le modèle à une seule diode, qui est le plus classique et le plus utilisé. Ce modèle fait intervenir une source de courant qui génère un courant(I_{ph}) proportionnel à l'éclairement, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule traversée par le courant(I_d), complété par une résistance série R_s et une autre parallèle R_{sh} pour les pertes [23]. Comme montrée dans **la Figure II.2** [24].

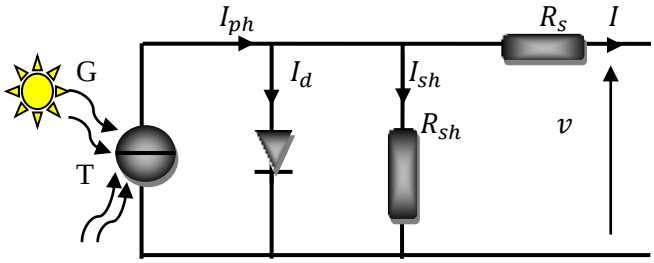


Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule PV à une diode

D'après la loi de Kirchhoff, le courant délivré par une cellule PV est donné par

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \text{(II.1)}$$

Le courant I_{ph}, est donné par la formule suivante :

$$I_{ph} = \left[I_{ph,n} + K_i\left(T - T_n\right)\right]\frac{G}{G_n} \qquad \text{(II.2)}$$

Le courant de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_o.\left[\exp\left(\frac{v + RI}{\alpha.KT/q}\right) - 1\right] \qquad \text{(II.3)}$$

Le courant aux bornes de la résistance parallèle est exprimé par :

$$I_{sh} = \frac{v + R_s.I}{R_{sh}} \qquad \text{(II.4)}$$

A la fin, l'équation caractéristique d'une cellule PV est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_o\left[\exp\left(\frac{v + R_s.I.}{a.V_t}\right) - 1\right] - \frac{v + R_s.I.}{R_{sh}.} \qquad \text{(II.5)}$$

Avec :

- I : Courant délivré par la cellule PV ;
- V : Tension à la borne de la cellule PV ;
- Io : Courant de saturation de la diode (A) ;
- a : Facteur d'idéalité de la diode ($1 \leq a < 1.5$) ;
- Vt : Tension thermique ;
- R_s : Résistance série ;
- R_{sh} : Résistance shunt (**Ω**).

II.2.1.2 Modèle du module PV

Le module est formé par plusieurs cellules connectées en série et en parallèle pour satisfaire une puissance (tension, courant) désirée**.**Donc l'équation caractéristique du module PV donnée comme suit [14] :

$$I = I_{ph} - I_o\left[\exp\left(\frac{v + R_s.I.}{a.V_t}\right) - 1\right] - \frac{v + R_s.I.}{R_{sh}.} \qquad \text{(II.6)}$$

Avec :

$$I_{ph} = I_{ph,cell}.N_p \qquad \text{(II.7)} I_o =$$

$$I_{o,cell}.N_p \qquad \text{(II.8)}$$

$$V_t = {KTN_s}/{q} \qquad \text{(II.9)}$$

Rappelons que, le générateur PV est constitué par la mise en série et en parallèle de plusieurs panneaux solaires afin d'obtenir une plus grande puissance. Pour le cas de N_{ss} panneaux connectés en séries et N_{pp} panneaux connectés en parallèles identiques et fonctionnent, théoriquement, dans les mêmes conditions, le courant d'un GPV est donné par la relation [25]:

$$I = N_{pp}I_{ph} - N_{PP}I_o\left[\exp\left(\frac{v + R_s.I.(N_{ss}/N_{pp})}{a.V_t.N_sN_{ss}}\right) - 1\right] - \frac{v + R_s.I.(N_{ss}/N_{pp})}{R_p.(N_{ss}/N_{pp})} \qquad \text{(II.10)}$$

II.3 Modélisation du convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC-DC, également appelés 'Hacheurs', sont essentiels dans les systèmes d'énergie solaire. Les Hacheurs sont des convertisseurs constitués par des éléments réactifs : capacité, inductance et des interrupteurs à amorçage et à blocage commandés (transistor, nommé K dans notre étude) et l'autre à blocage et amorçage spontanés (diode, nommée D). Ces composants, dans des conditions idéales, ne consomment aucune puissance, ce qui conduit à un rendement élevé[11]. Pendant le fonctionnement du convertisseur DC/DC, l'interrupteur K sera commuté à une fréquence constante (*f),* avec un temps de fermeture égale à $\mathbf{DT_s}$et un temps d'ouverture de $\mathbf{(1-D)\ T_s}$. La **Figure II.3**montre la tension de l'interrupteur K (transistor).

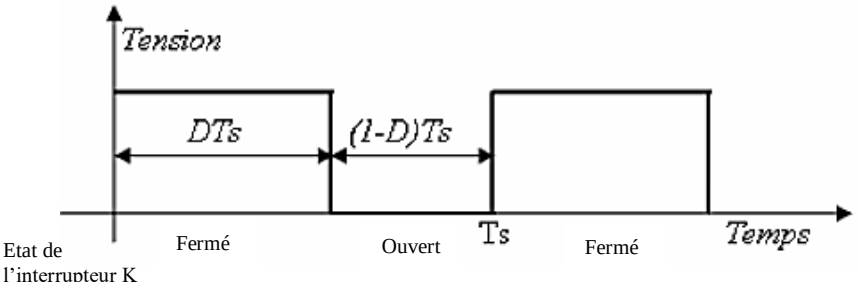


Figure II.3 : Tension de l'interrupteur K (transistor).

Avec :

T_s : Période de commutation, on à : $T_s=1/f$;

D :Rapport cyclique du commutateur, $D \in [0,1]$.

II.3.1 Convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) [26]

Le convertisseur le plus utiliséest le hacheur du type '*Buck-Boost'*, du fait qu'il regroupe en même temps les propriétés électriques d'un survolteur et d'un dévolteur. Son schéma est illustré dans **LaFigure II.4** :

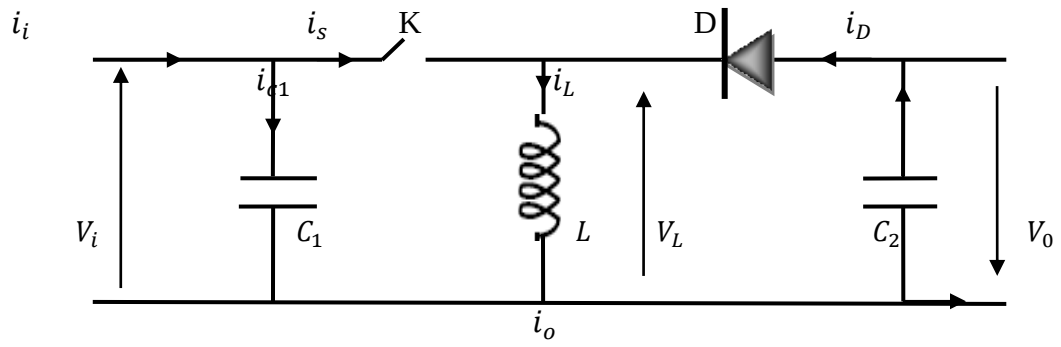
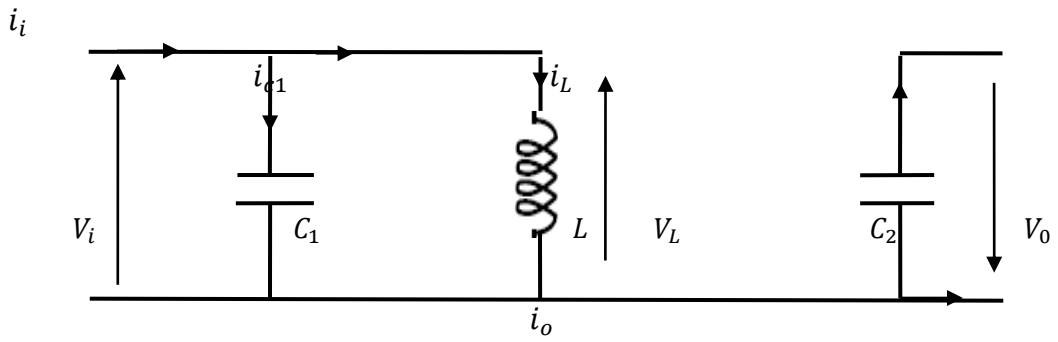


Figure II.4 : Schéma de principe d'un hacheur *Buck-Boost*

Le fonctionnement d'un convertisseur *Buck-Boost* peut être divisé en deux configurations selon l'état de l'interrupteur *K* :

L'état passant, t ϵ [0; DTs] : l'interrupteur *K* est fermé, ce qui conduit à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance *L*. **Lafigure II.5** représente le circuit équivalent d'un convertisseur Buck-Boost quand l'interrupteur K est fermé.

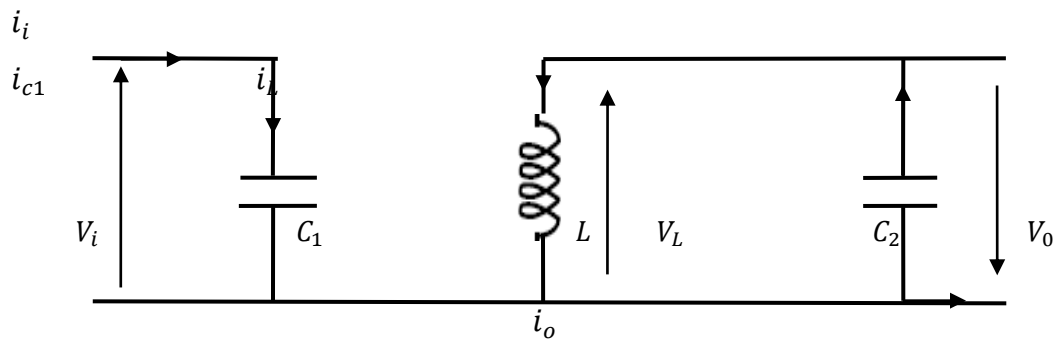


FigureII.5 : Circuit équivalent d'un Buck-Boost quand l'interrupteur estfermé

Appliquant la loi de Kirchhoff on trouve les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_o(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

L'état bloqué, t ϵ[dTs; Ts]: l'interrupteur *K* est ouvert il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge. La **Figure II.6** représente le circuit équivalent d'un convertisseur Buck-Boost quand l'interrupteur K est fermé



FigureII.6: . Circuit équivalent d'un Buck-Boost quand l'interrupteur K estOuvert

Appliquant la loi de Kirchhoff on trouve les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} = -v_o(t) \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

La dynamique valable pour les deux intervalles de temps est représentée par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = (i_{i-} i_l) dT_s + i_i(1-d)T_s \\ c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s = i_o dT_s + (i_l + i_o)(1-d)T_s \\ l \frac{di_l(t)}{dt} T_s = v_i dT_s - v_o(1-d)T_s \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

$$\begin{cases} I_i - dI_l = 0 \\ (1-d)I_l + I_o = 0 \\ dV_i + (1-d)V_o \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

II.4 Description des Contrôleurs MPPT

L'inconvénient major des systèmes PV est le faible rendement énergétique pendant les périodes d'irradiation faible ou partiellement ombragées. Par conséquence, la quantité de l'énergie électrique générée change continuellement avec les conditions météorologiques (l'éclairement et la température). Ceproblème motive les chercheurs à adapter un contrôleur MPPT afin d'extraire le maximum de la puissance du système PV quel que soit les conditions climatiques [28]. Dans le présent travail, un contrôleur MPPT est mis en œuvre pour maximiser la puissance à la sortie du système PV, en ajustant le rapport cyclique du convertisseur *buck-boost,* comme montre la **FigureIII.1**.

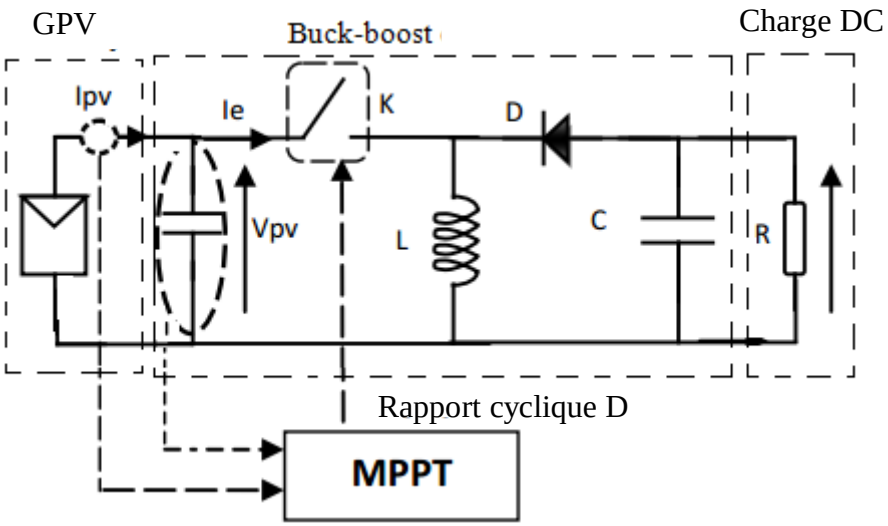


Figure II.7 : système PVavec le contrôleur MPPT.

II.5 Critères de choix des algorithmes MPPT

Actuellement, de nombreuses techniques MPPT sont disponibles dans la littérature. Afin d'effectuer un choix adéquat parmi les différentes techniques MPPT existantes, certains critères de choix des algorithmes MPPT doit être prendre en compte[29]. **Tableau II.1** représente ces critères

TableauII.1 : Critèresde choix des algorithmes MPPT

Critères	Descriptions
a) Implémentation	▪ La facilité de mise en œuvre est un facteur important dans le choix des techniques MPPT. La commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important pour favoriser un coût raisonnable.
b) Efficacité	▪ L'efficacité de la technique MPPT est associée à : 1. **Rapidité de réponse** : La commande MPPT doit avoir un bon comportement pour assurer que l'adaptation face aux changements des conditions climatiques soit faite le plus rapidement possible. 2. **Précision de suivi du MPP** : Certaines méthodes MPPT oscillent autour du point MPP. 3. **Stabilité et robustesse du système** : Elle doit pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GPV soit le plus près possible du PPM dans n'importe quelle condition météorologique.
c) Coût	▪ Le coût des dispositifs MPPT dépend des caractéristiques du système, la complexité de l'implémentation et le nombre des capteurs utilisés.

II.6Algorithmes MPPT pour le générateur photovoltaïque

Dans le présent travail, trois algorithmes MPPT sont développés et exploités à savoir : Perturbation et Observation (P.O), Conductance Incrémental (Inc-Con) et Logique Floue.

II.6.1 Algorithme dePerturbation et Observation (P&O)

Le principe de fonctionnement de la méthode P&O est basée sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement de module PV avec un pas fixe où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis en observant son effet sur la puissance de la sortie du GPV [30]. La **Figure II.8** présente l'organigramme de l'algorithme P&O [31]. Si la valeur de la puissance actuelle ***P(k)***du panneau est supérieure à la valeur précédente ***P(k-1)***alors nous gardons la même direction de perturbation précédente sinon nous inversons la perturbation du cycle précédent.

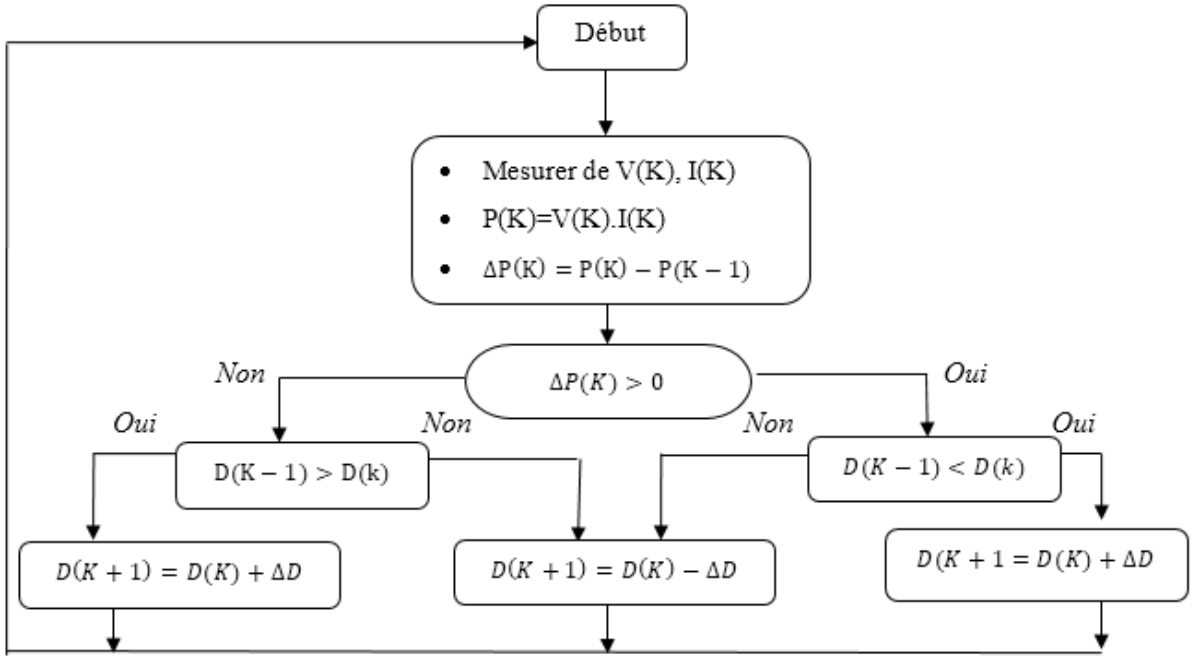


Figure II.8 : Organigramme de l'algorithme **P&O**

L'algorithme P&O est le plus utilisé dans les systèmes PV, en raison de sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Cependant, l'inconvénient de la technique de P&O est que, à l'état stable c'est-à-dire le point de puissance maximale est atteint,le point de fonctionnement oscille autour du MPP, causant la perte d'une certaine quantité d'énergie disponible [32].

En plus de cela, dans le cas d'une soudaine augmentation de l'irradiation, l'algorithme P&O réagit comme si l'augmentation est produite par l'effet de la perturbation précédente, alors il continue dans la même direction, qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. Ces changements atmosphériques sont souvent produits dans les véhicules solaires lors de leurs passages dans une zone d'ombre tels que végétation ou bâtiments.

II.6.2 Algorithme Conductance Incrémentale (Inc-Cond)

Le principe de fonctionnement de l'algorithme d'Inc-Cond est basé sur la connaissance de lavariation de conductance dumodule PV et des conséquences sur la position du point defonctionnement par rapport à un PPM.

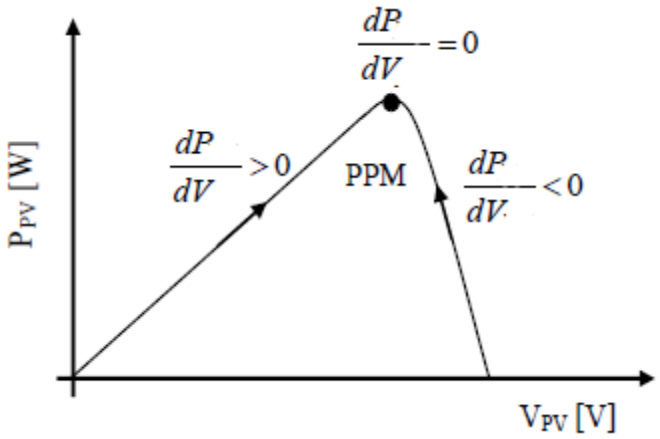
Notons quela conductance du module PV, nommée ***G*** est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV :

$$G = \frac{I}{V} \quad \text{(III.1)}$$

Et l'incrémentale conductance est définit par :

$$\Delta G = \frac{dI}{dV} \text{(III.2)}$$

D'un autre côté, nous avons connu que l'évolution de la puissance du module (P_{PV}) par rapport à la tension (V_{PV})donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM comme illustre la **FigureII.9** La dérivée de la puissance est nulle au point de puissance maximale (PPM), positive à gauche et négative à droite du point PPM [33].



FigureII.9: Technique de l'algorithme Inc-Cond.

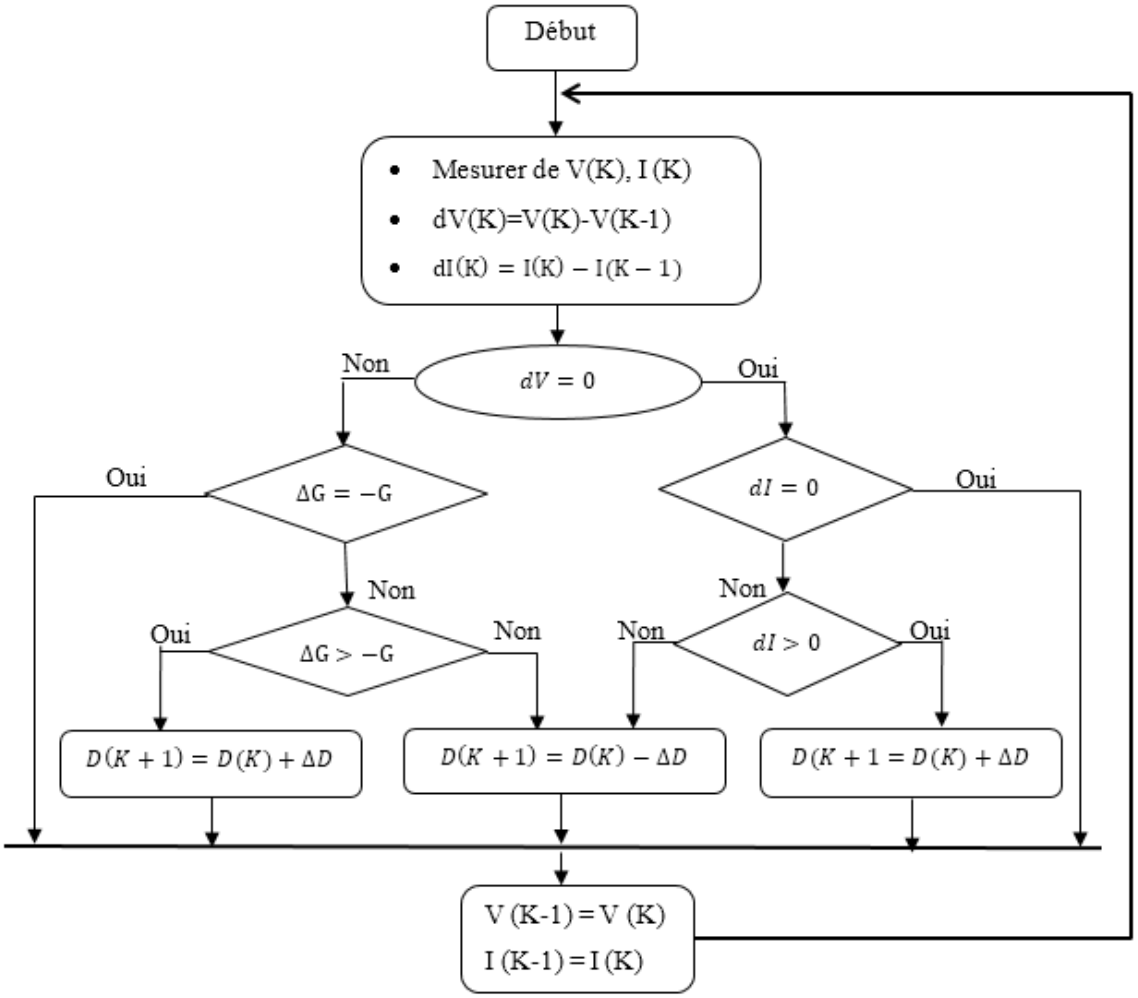
Ce concept est exprimé par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} dP/dV \rangle 0 & si \quad \Delta G \rangle -G \\ dP/dV = 0 & si \quad \Delta G = -G \\ dP/dV \langle 0 & si \quad \Delta G \langle -G \end{cases} \qquad \text{(III.3)}$$

Le calcul de la dérivée de la puissance en fonction de la tension de la sortie du panneau***(dP/dV)***, est donné par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \text{(III.4)}$$

La FigureII.10donne l'organigramme de la méthode d'Inc-Cond.



FigureII.10 : Organigramme de la méthode d'Inc-Cond.

II.6.3Conception du contrôleur MPPT flou

Le principe d'une commande MPPT flou (**F**uzzy **L**ogic **C**ontroller : FLC) se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur*E* et le changement d'erreur *CE ;* une variable de sortie qui est le changement dans le rapport cyclique *ΔD.*La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM.Selon **laFigureII.11**le contrôleur MPPT floucontient trois éléments principaux :Fuzzification, méthode d'inférenceet la défuzzification[34].

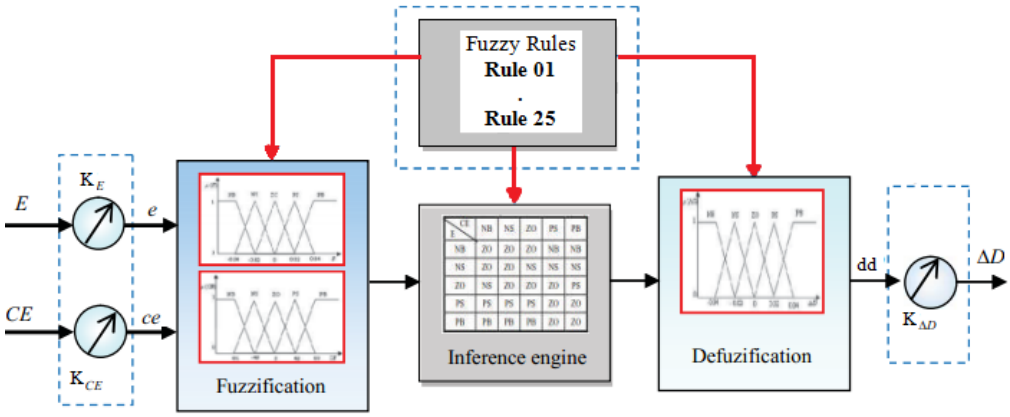


Figure II.11 : Structure de base d'un FLC.

1) Fuzzification

Cette étape permet de passer de variables réelles (entrées numériques)à desvariables floues [35]. La tension et le courant réels du module PV peuvent être mesurés continuellement etla puissance peut être calculée. Les variables d'entrée E et CEpeut exprimer respectivement par

$$E(K)=\frac{P_{pv}(K)-P_{pv}(K-1)}{V_{pv}(K)-V_{pv}(K-1)} \quad \text{(III.5)}$$

$$CE(K)=E(K)-E(K-1) \text{(III.6)}$$

Où **: P (k) et I (k)** sont respectivementla puissance et le courant de module PV**.**

L'entrée *E(k)* montre la position de le point de fonctionnement,si est situé à gauche ou à droite du PPM de la courbe P-V, tandis que l'entrée *CE(k)* montre la direction du point de fonctionnement.

Variables linguistiques :

Afin d'exprimerles variables d'entrée en variables linguistiques,cinq ensembles flous sont adoptés :

- **PG :**Positif Grand ;
- **PP :**Positif Petit **;**
- **ZE :**Zéro ;
- **NP :**Négatif Petit ;

- **NG :**Négatif Grand**.**

Fonctions d'appartenances :

Notons que, la génération de fonctions d'appartenances s'effectue par une méthode d'essai où on basant sur l'expérience humaine. Jusqu'à présent,Il n'existe aucune méthode pour la formulation des stratégies de la logique floue. Dans le présent travail nous avons adopté la référence [34] pour produire lesfonctions d'appartenances. La**figureII.12**montre les fonctionsd'appartenance du cinq sous-ensemble floue debase pour les variables d'entrée et de la sortie.

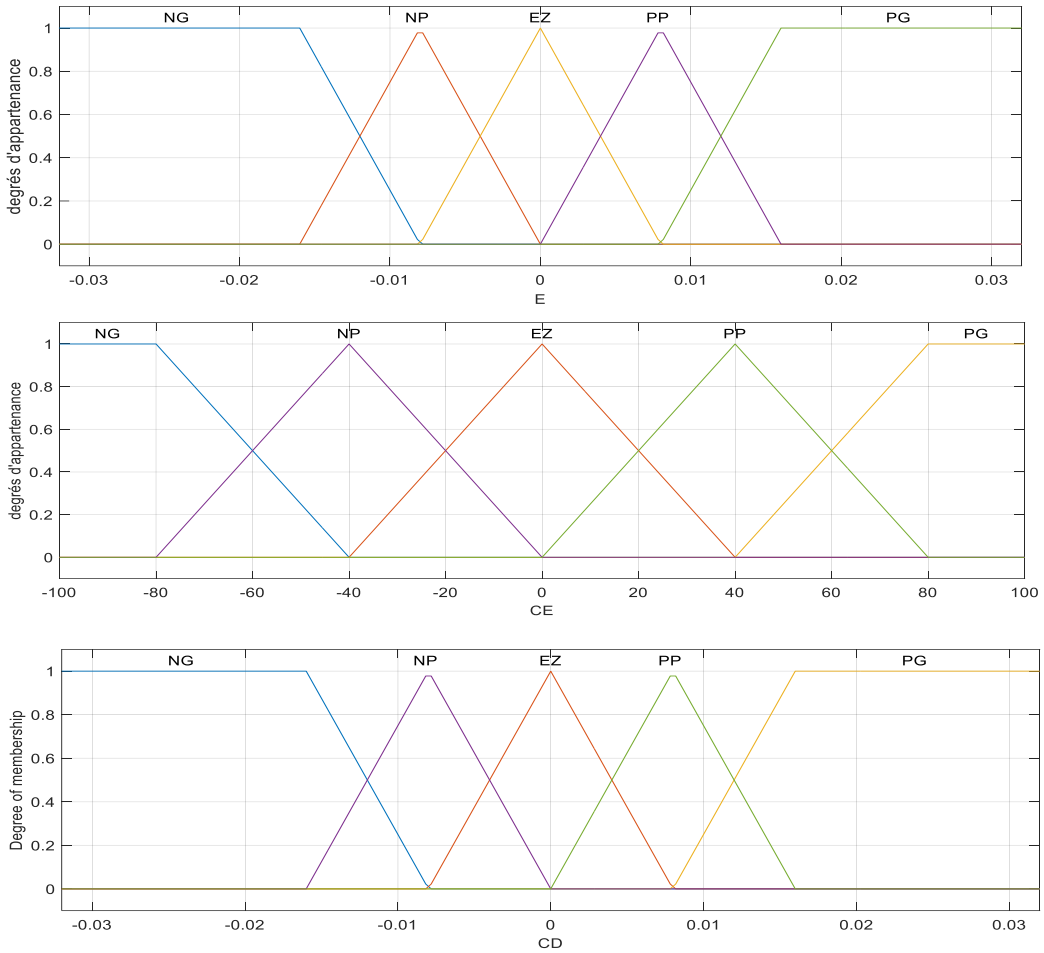


Figure II.12: Fonction d'appartenances des entrées : E, CE et de la sortie ΔD.

2) Méthode d'inférence

LeTableauII.2représente la matrice d'inférence du régulateur floue MPPT. Les règles de contrôle doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée (E) doit toujours être égale à zéro. Nous avons choisi dans cette étude la méthode de Mamdani comme une méthode d'inférence floue' [36].Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU.

Tableau II.2 : Table de règles floues (matrice d'inférence)

CE / E	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	**ZE**	**ZE**	**PG**	**PG**	**PG**
NP	**ZE**	**ZE**	**PP**	**PP**	**PP**
ZE	**PP**	**ZE**	**ZE**	**ZE**	**NP**
PP	**NP**	**NP**	**NP**	**ZE**	**ZE**
PG	**NG**	**NG**	**NG**	**ZE**	**ZE**

3) Défuzzification

Actuellement, il est nécessaire de passer de «domaine floue» vers «domaine réel», c'est la Défuzzification. Cette étape peutêtre envisagée avec différentes méthodes, mais la plus populaire est appelée méthode de « centre de gravité ». Le centre de gravité de la fonction d'appartenance μ.(Di) est calculé simplement pour obtenir les valeurs réelles, elle est donnée par [37] :

$$\Delta D = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu(D_i) - D_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu(D_i)} \qquad \text{(III.7)}$$

II.7Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté la modélisation d'un système PV constitué d'un générateur PV et de convertisseurs pour adapter le GPV à la charge. Le modèle de convertisseurs électriques élaboré dans ce chapitre sera utilisé pour commander et optimiser l'énergie produite par le GPV. Nous avons également présenté le contrôle du système PV afin d'améliorer l'efficacité de la source PV, en adoptant trois algorithmes MPPT : Perturbation et Observation, Conductance Incrémentale et la Logique Floue. Le chapitre suivant présentera les blocs de simulation et les résultats obtenus.

Chapitre III :Résultats de Simulation

III.1 Introduction

Dans ce cadre nous avons utilisé un outil informatique *MATLAB/SIMULINK (Matlab, R2016b)*, qui permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement du système PV.Dans le cadre de ce travail, le système PV développé est constitué par un module PV du type **KC200GT**, comporte 54 cellules connectées en série pour offrir une puissance de 200 W, un hacheur buck/boost commandé par les différents contrôleurs MPPT (PO, Inc-Cond et FLC).

III.2 Réalisation du panneauPV sur Matlab/simulink

Le **tableau IV.1**représente les paramètresdu panneau PV adoptés dans ce travail.

Tableau III. 1 : Paramètresdu panneauPV

KC200GT		
▪ Puissance maximal	P_{max}	200 W
▪ Tension de circuit-ouvert	V_{oc}	32.9 V
▪ Courant de court-circuit	I_{sc}	8.21 A
▪ Courant de saturation de la diode	$I_{o,n}$	$9.8214.10^{-8}$ A
▪ Photo-courant	I_{ph}	8.214 A
▪ Résistance série	R_s	0.221 Ω
▪ Résistance parallèle	R_{sh}	415.405 Ω
▪ Facteur d'idéalité de la diode	α	1.3
▪ Nombre de cellules PV connectées en série	N_s	54

III.2.1 Blocs diagramme des fonctions de module PV sous Matlab/Simulink :

Pour construire un modèle équivalent dans l'environnement *MATLAB* de module PV, on adopteles équations qui sont représentés dans le chapitre **II**.

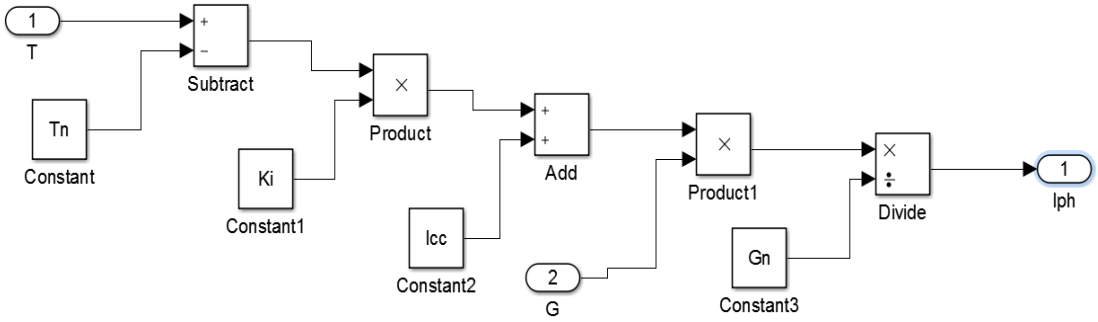


Figure III.1 : Blocs diagramme de photo-courantI_{ph}.

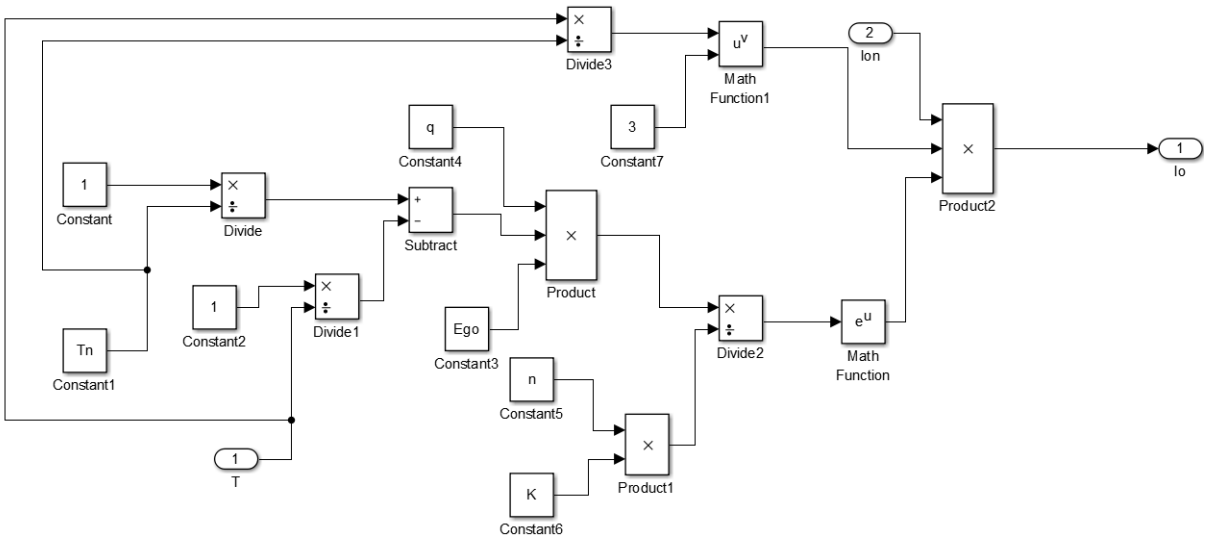


Figure III.2 : Blocs diagramme de courant de saturationI_o

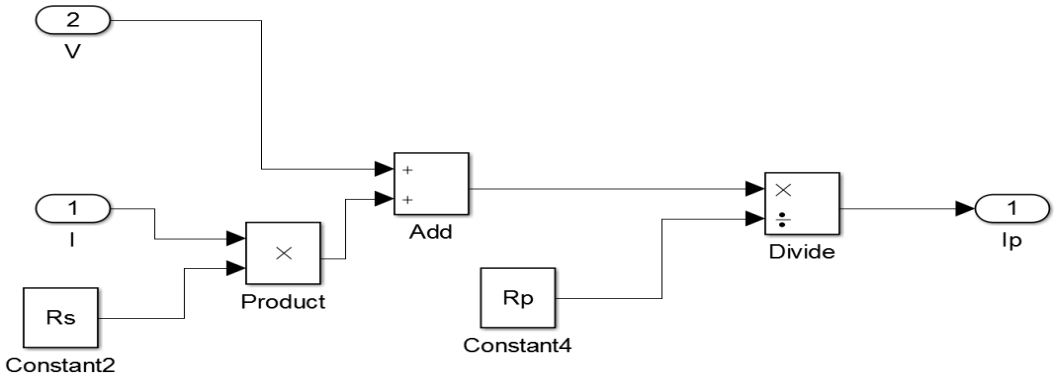


Figure III.3 : Blocs diagramme de Courant de shuntI_p.

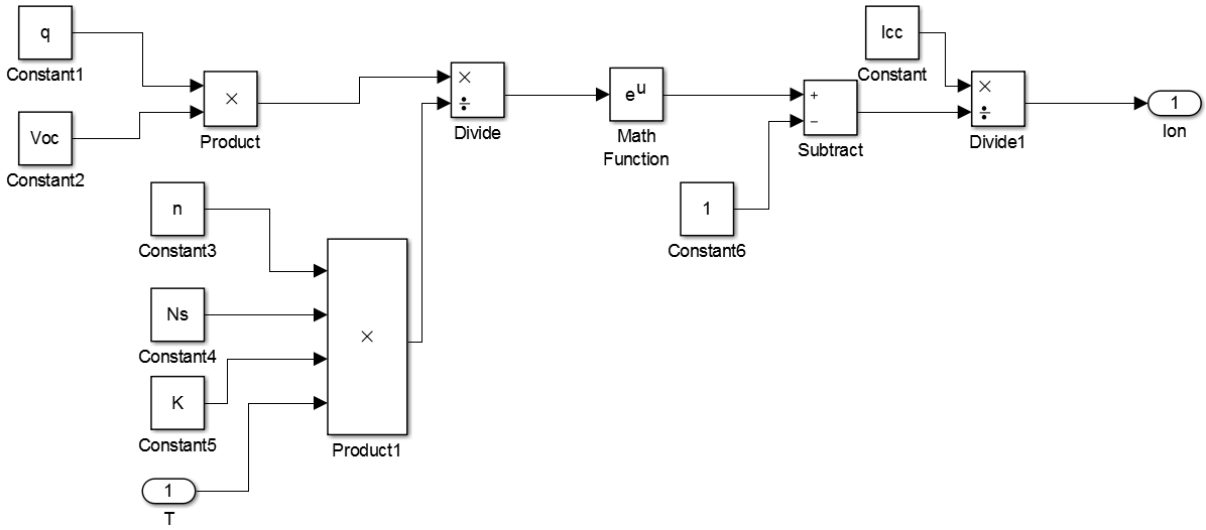


Figure III.4 : Blocs diagramme de courant de fuite (I_{rs} ou I_{on}).

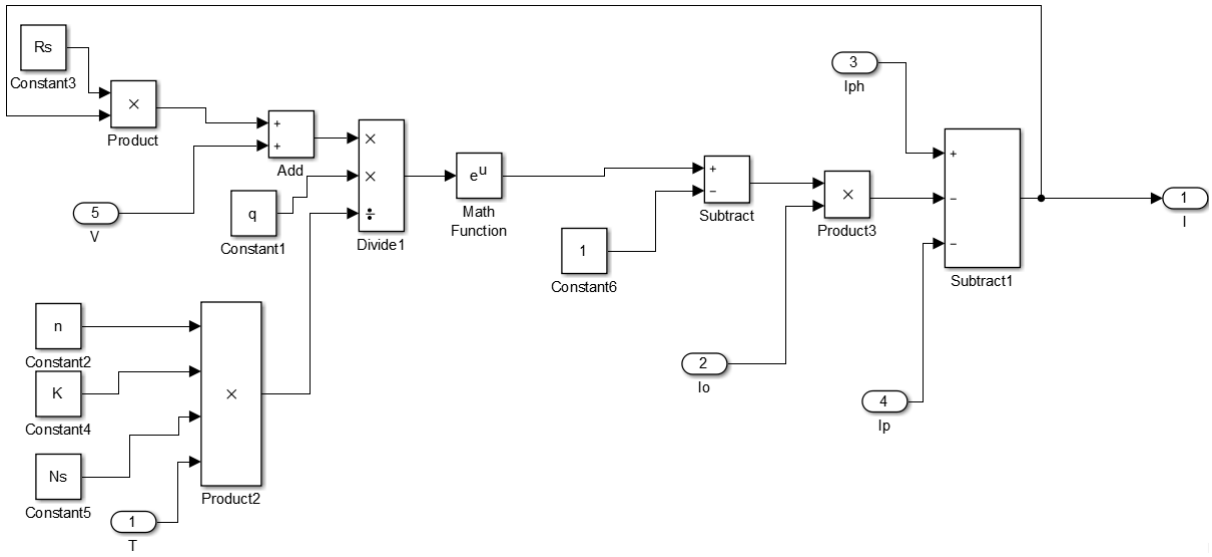


Figure III.5 : Blocs diagramme de courant I.

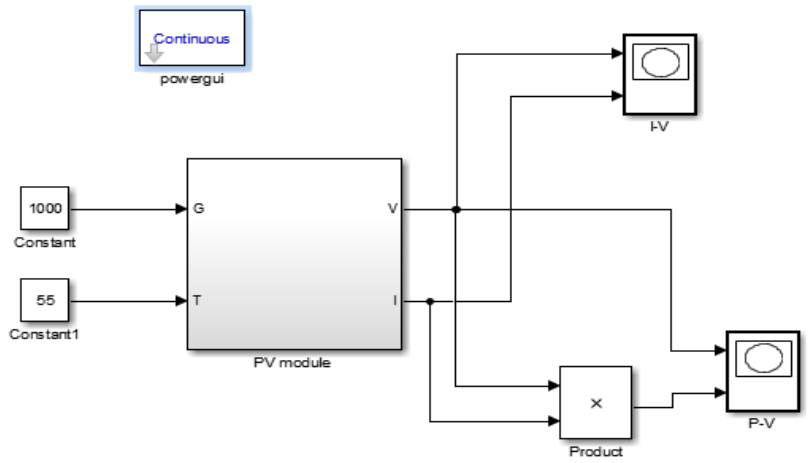


Figure III.6 : Schéma de simulation d'un module PV.

III.3Résultat de simulation :

III.3.1 Pour un éclairement G et une température T constante :

Les courbes I-V et P-V obtenus sous les conditions nominales (G_n= *1000W/m*^{2}, T_n= *25C°*), sont représentée respectivement dans lesFigures (III.7et III.8.) :

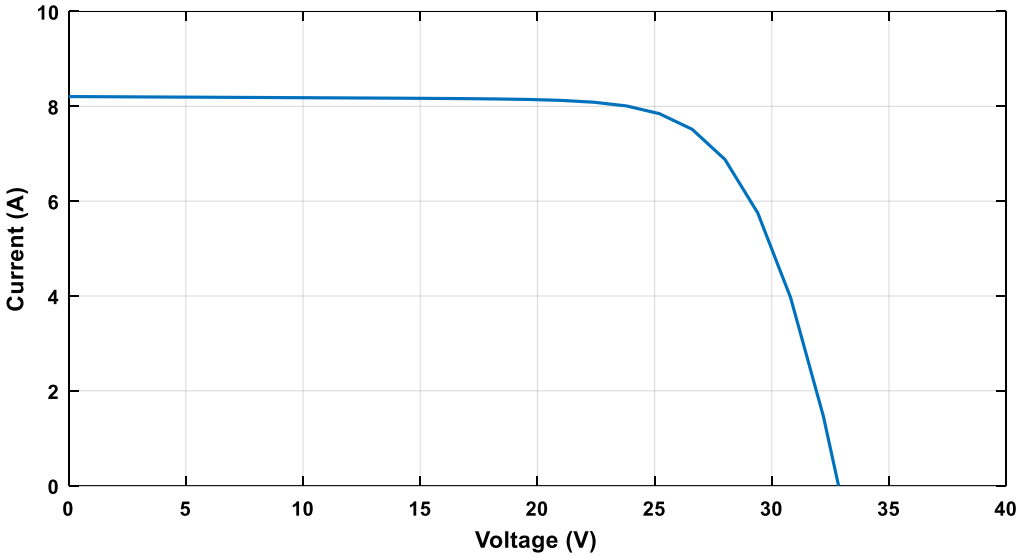


Figure III.7 : Caractéristique I-V d'un module PV à 25°C et 1000 (W/m2).

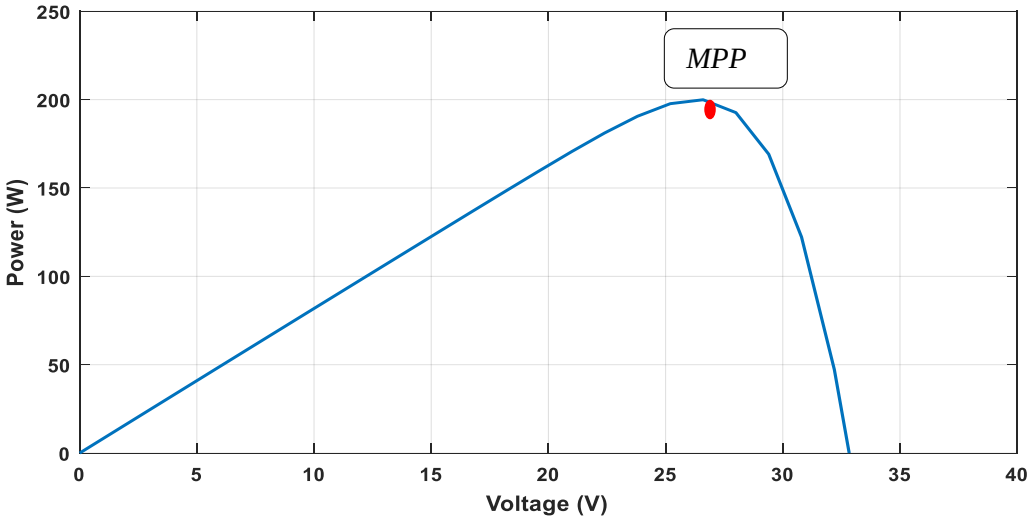


Figure III.8 : Caractéristique P-V d'un module PV à 25°C et 1000 (W/m2).

Sous les conditions nominales,le coude sur la courbe (P-V) est un point unique appelé MPP (Maximum Power Point), où le module PV fonctionne à puissance maximale (Pmax), qui correspondant à une valeur maximale du courant (Imp) et de tension (Vmp) recherchée par les algorithmes MPPT.

III.3.2 Pour un éclairement G et une température T variable

Dans cette section, nous représentons l'influence de la température et de l'ensoleillement sur les caractéristiques P-V, I-Vd'un modulePV**.**

- **Influence de l'éclairement G :**

Au préalable, la température étant fixée à T = 25°C. L'éclairement est varié, il prend respectivement les valeurs : 700, 800, 900, 1000W/m^2. La figure **III.9** illustre l'effet de l'éclairement sur les caractéristiques : P-V et I-V d'un module solaire sous une température constante.

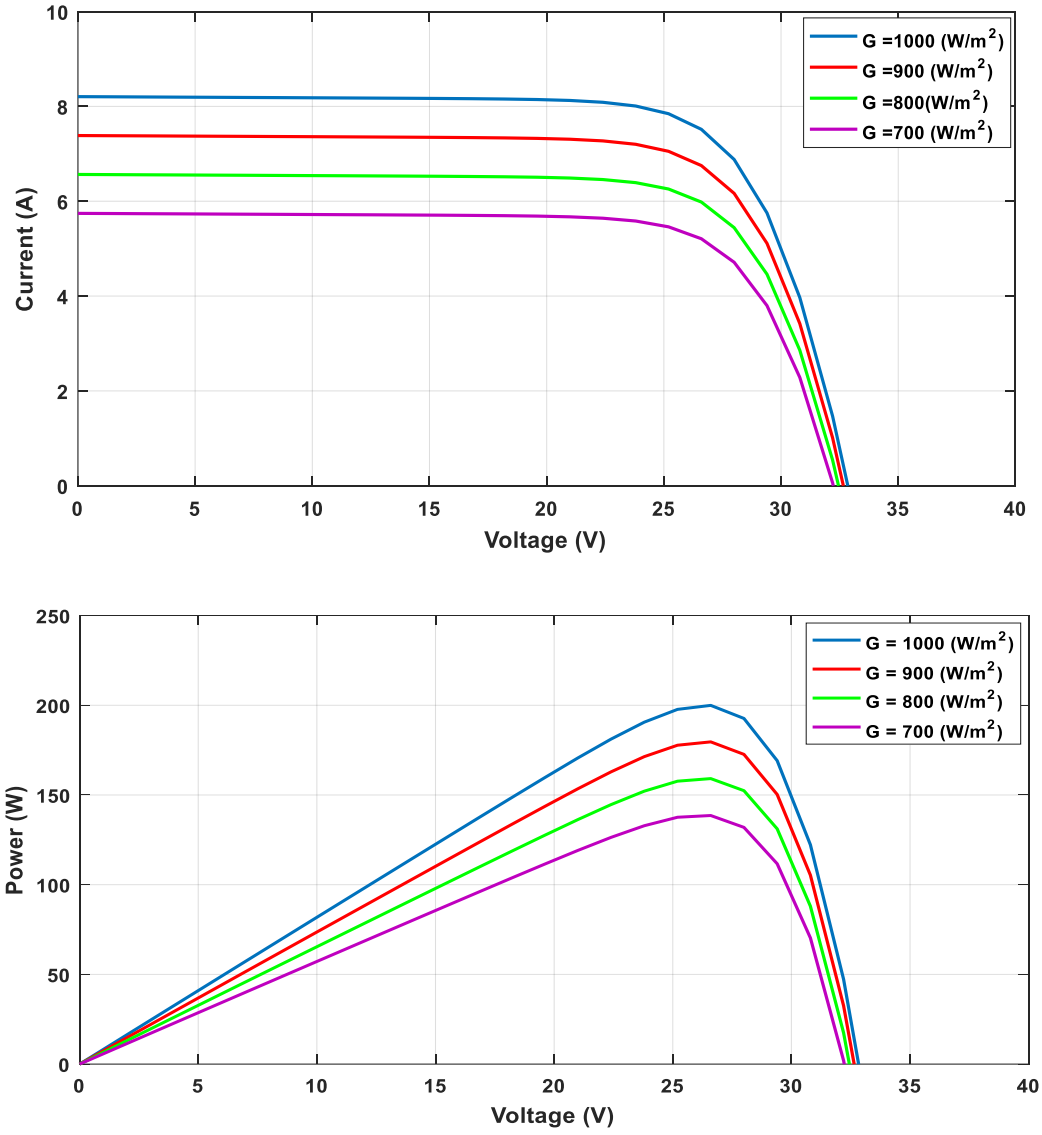


Figure III.9 : Influencedel'irradiationsurI(V)et P(V).

➢ **Interprétation**

D'après les résultats donnés par la figure (III.9), nous remarquons que les valeurs du courant de court-circuit et de la puissance sont directement proportionnelles avec l'intensité d'éclairement ; tandis que la tension en circuit ouvert est légèrement variée.

▪ **<u>Influence de température T :</u>**

Dans ce cas, c'est l'éclairement qui prend une valeur fixe de 1000 W/m^{2,} maisla température varie comme suit : 25, 35, 45 et 55°C. La figure **III.10** présente les caractéristiques : I-V, P-V d'un module solaire pour différentes températures sous un éclairement constant.

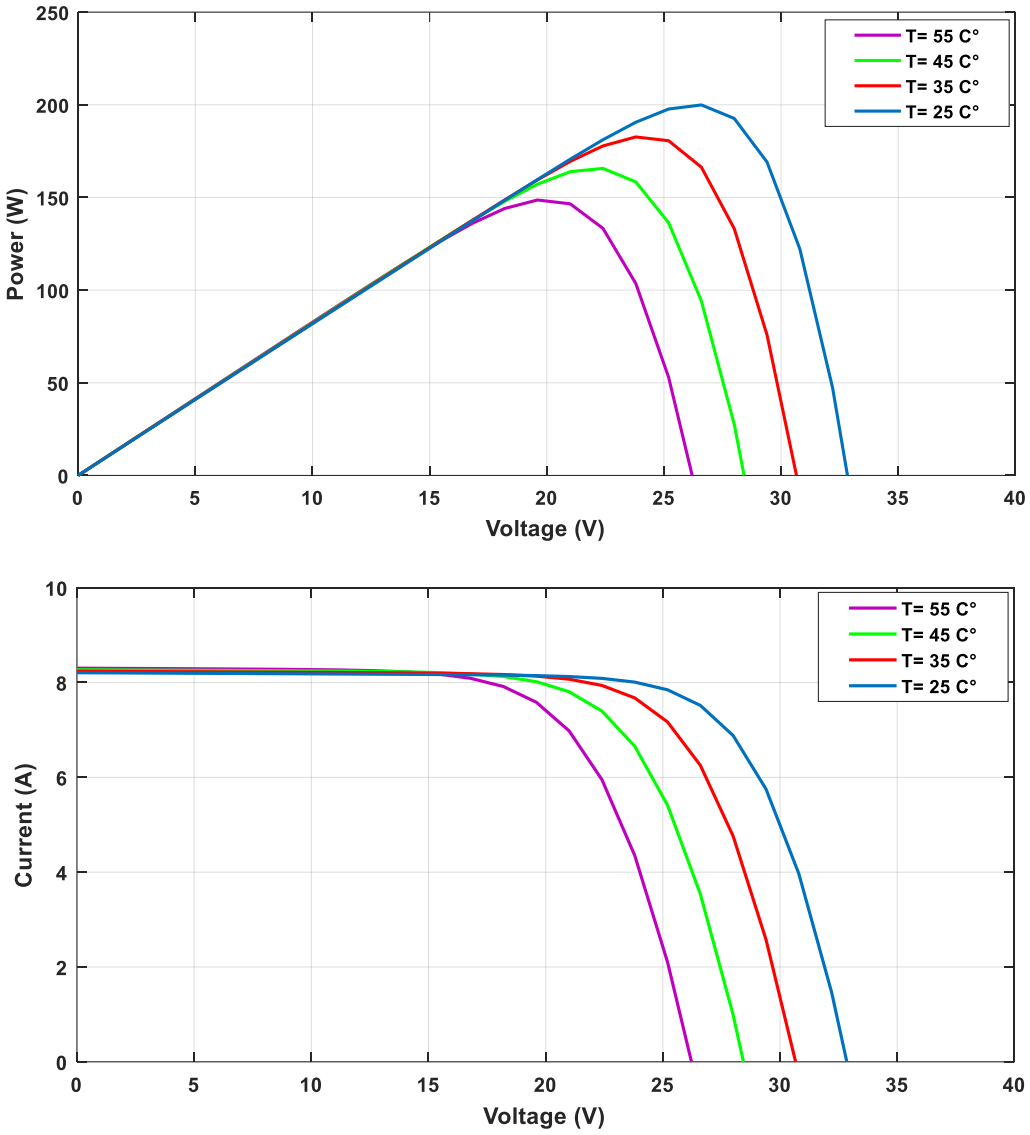


Figure III.10 : Influencede latempératuresurlescaractéristiquesI(V)etP(V).

➢ **Interprétation**

Pour une température qui change de 25°C à 55°C sous un éclairement constant, on peut voir que la variation de la tension est plus grande que celle du courant. La tension d'un module solaire est inversement proportionnelle avec la température.

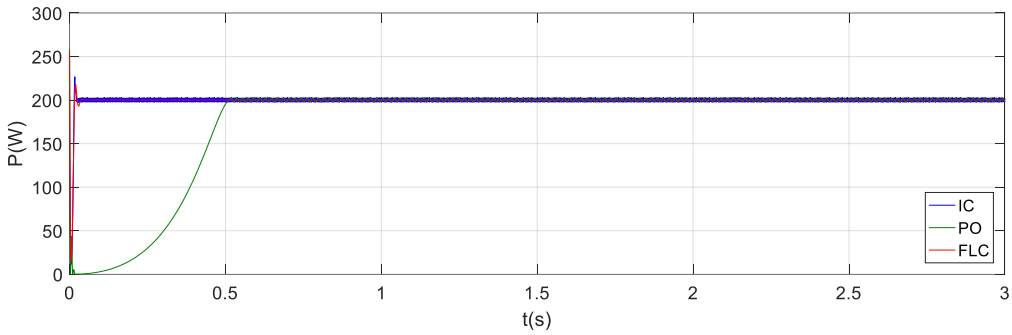
III.4Tests d'efficacité des algorithmes MPPT

Afin d'évaluer l'efficacité et la performance des trois techniques MPPT : P&O, Inc-Cond et FLC, le système PV doit être testé sous différentes irradiations et sous différentes températures.

III.4.1 Résultatsde simulation sous lesconditionsstandards :

Danslesconditionsstandardsenprenddesvaleursinitiales fixesetoptimales.

- Irradiation=1000W/m^2 ;
- Latempérature=25.°



FigureIII.11: Puissance de la sortie du système PV.

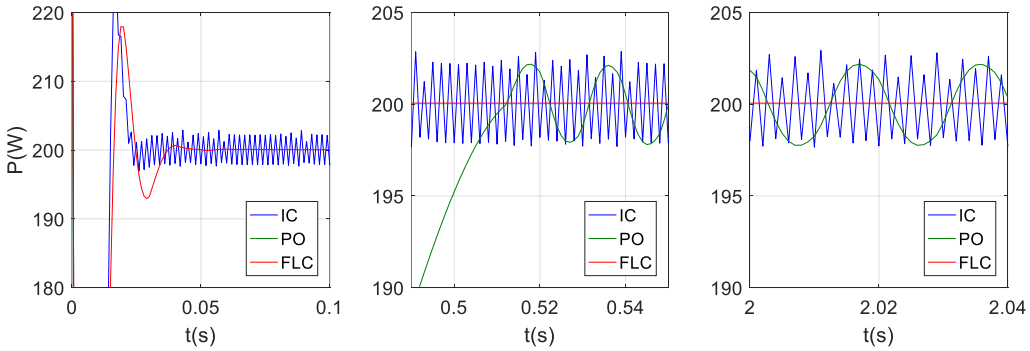
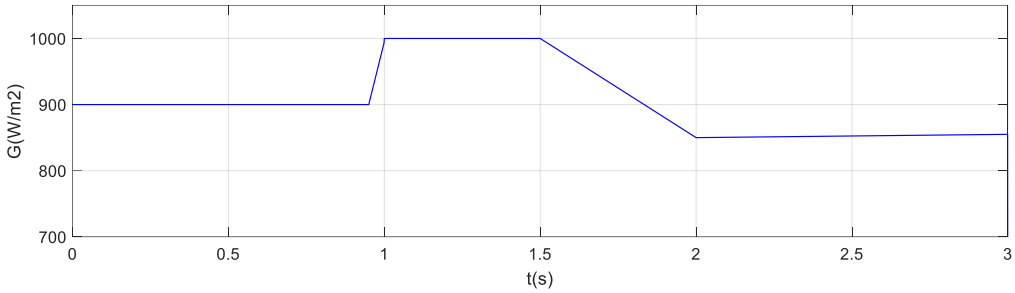


Figure III.12 : Zoom de la puissance de la sortie du système PV.

III.5Résultatsde simulations sousunevariationd'irradiation :

La température étant fixée à T =25 C°. La figure **III.13**présente leProfil de l'irradiation. L'éclairement est brusquementaugmenté de 900 à 1000 W/m^2, puis à partir de 1.5(s), il est progressivement diminué de 1000 à 850 W/m^2, enfin, il est resté stable à la valeur 850 W/m^2 à partir de la 2(s).



FigureIII.13: Profildel'irradiation.

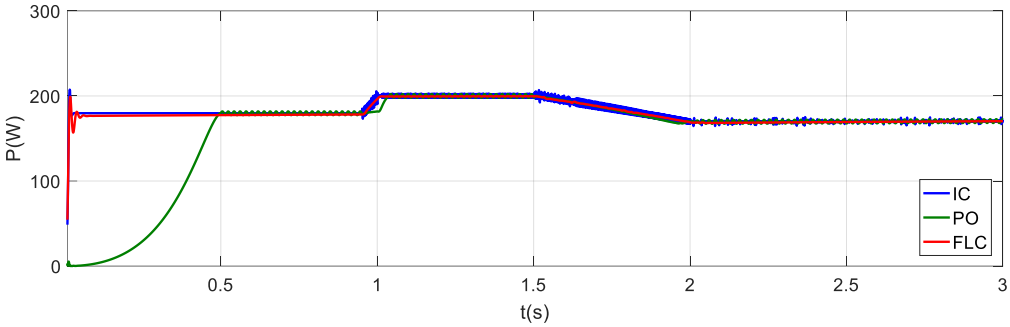
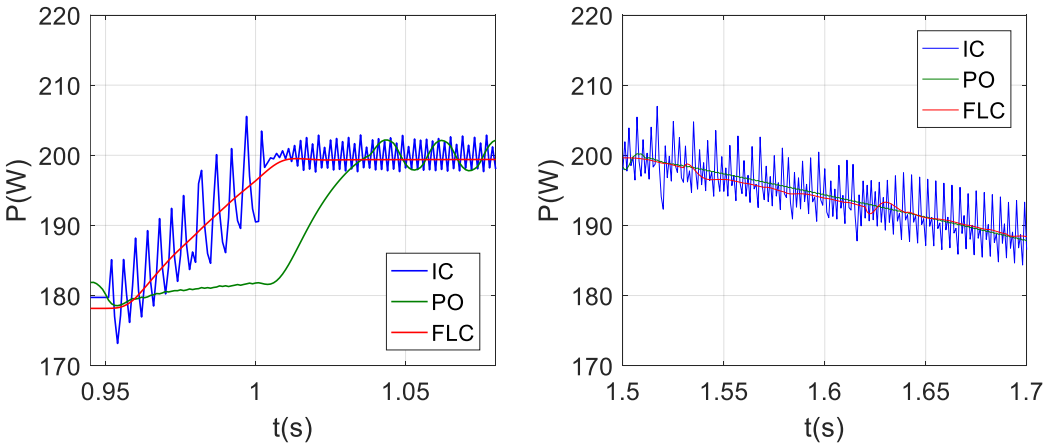


Figure III.14 : Puissance de la sortie du système PVsous une variation d'irradiation**.**



FigureIII.15: Zoom de lapuissance de la sortie du système PV.

III.6Résultats de simulations sous une variation dela température

En plus de l'ensoleillement, la température est un facteur important qui influe sur les caractéristiques du panneau solaire. Les figures :**III.16,III.17**représentent respectivement le profil de la température, la réponse du système PV à des variations de la température (G= 1000 W/m^2).

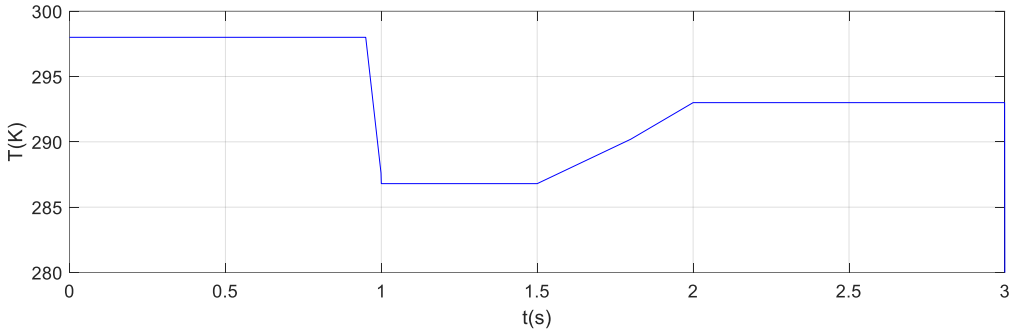
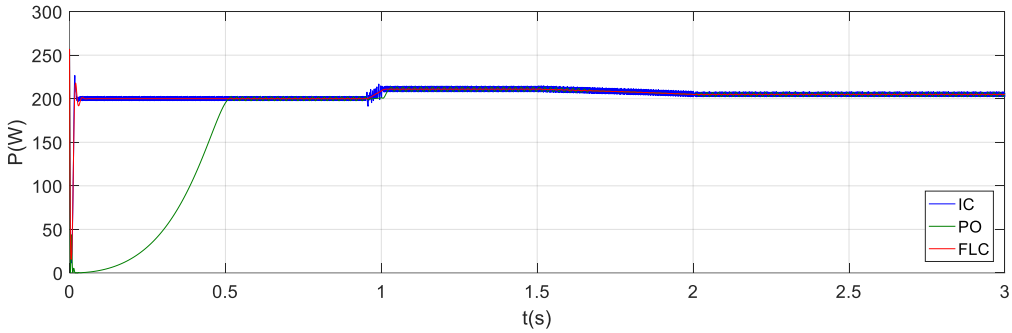


Figure IV.16 : Profil de la température**.**



FigureIII.17 : Puissancede la sortie du système PV dans lecas de changementdetempérature

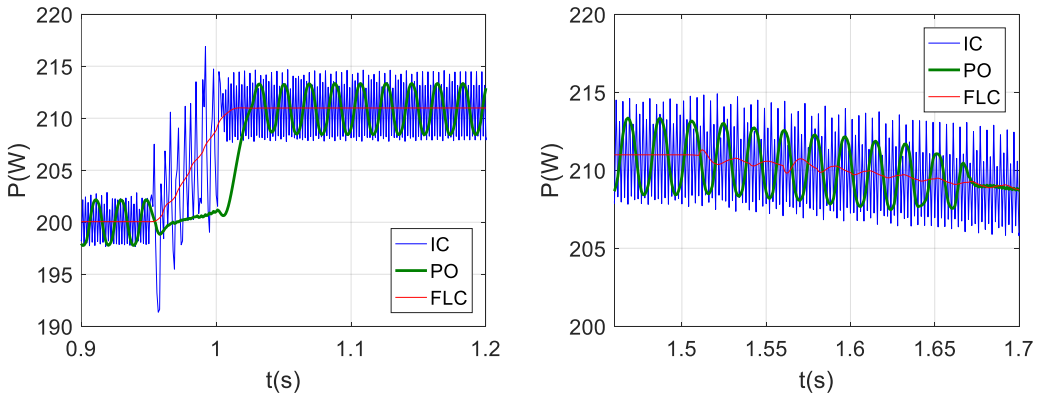


Figure III.18 : Zoom de lapuissance de la sortie du système PV.

- **Interprétation des résultats :**

Selon les résultats de simulation nous ne constatons que le système PV produit le maximum de la puissance avec les trois MPPT appliqués P&O, Inc-Cond et FLC.

Pendant le régime stableou**lentement changeantes :**les l'algorithme P&O In Cond présentent une réponse rapideavec des oscillations autour de la valeur optimale, Cependant, le contrôleur MPPT flou offre de meilleures performances par rapport les autres contrôleurs MPPT (P&O) et MPPT (Inc-Cond), ils fonctionnent au point optimal sans oscillations avec un temps de réponse plus rapide.

Pendant le changementbrusque de l'ensoleillement (Température), l'algorithme P&O réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction voir les**FiguresIII.15 et III.18**dans la zone [0.95 – 1]**,** ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement (Température), ce qui fait un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement. Le contrôleur MPPT flou et Inc-Condmontrent une réponse rapide sous les changements brusques des conditions atmosphériques.

III.7Conclusion

Ce dernier chapitre présente une simulation d'un systèmePV sous différents conditions climatiques, pourtester lesperformances des commandesl'algorithme MPPT adaptés. Les résultats obtenus montrent quele contrôleur MPPT flou est le plus efficace que lesautres méthodes (P&O et Inc-Con).

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la modélisation, la simulation et la commande d'un système PV, de comprendre son fonctionnement.

Dans le but d'atteindre et de maintenir le point de fonctionnement du panneau solaire à son point de puissance maximalequel que soit les conditions climatique, différents commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisés. Parmi les algorithmes MPPT, nous avons exploré :

- La méthode de Perturbation et Observation (P&O)
- La méthode de l'incrément de conductance (INC)
- La logique floue

Les résultats de cette recherche montrent que chaque algorithme a ses avantages spécifiques en termes de réponse aux changements environnementaux et d'optimisation de l'efficacité énergétique.Cependant à notre avis, le contrôleur MPPT flou est le plus efficace que les autres techniques.

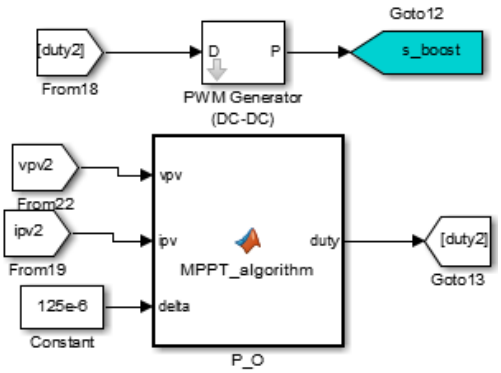
Comme perspectives, on peut envisager :

- Ajouter le système de stockage ;
- Connexion du GPV avec le réseau électrique ;
- Hybridation des GPV avec d'autre sources (comme le générateuréolien, pile à combustible…).
- Si possible, validations pratiques.

Annexe A

Annexe A

A. 1. AlgorithmePerturbation et Observation(P&O) sous MATLAB



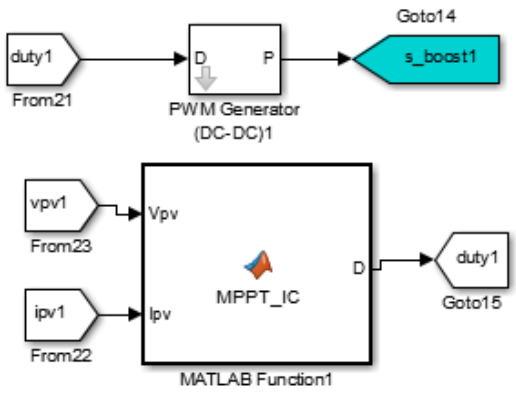
FigureA.1 : Block delacommandeMPPT(P&O)sous Matlab

- **l'algorithme de MPPT (P&O) :**

```
functionduty = MPPT_algorithm(vpv,ipv,delta)
% I used the MPPT algorithm in the MATLAB examples
% I only modify somethings.
duty_init = 0.1;
% min and max value are used to limit duty between
% 0 and 0.85
duty_min=0;
duty_max=0.85;

persistent Vold Pold duty_old;
% persistent variable type can be store the data
% we need the old data by obtain difference
% between old and new value
if isempty(Vold)
Vold=0;
Pold=0;
duty_old=duty_init;
end
P= vpv*ipv; % power
dV= vpv - Vold; % difference between old and new voltage
dP= P - Pold;% difference between old and new power

% the algorithm in below search the dP/dV=0
% if the derivative equal to zero
% duty will not change
% if old and new power not equal
% &
% the algorithm will works
if dP ~= 0
```

```
if dP < 0
if dV < 0
duty = duty_old - delta;
else
duty = duty_old + delta;
end
else
if dV < 0
duty = duty_old + delta;
else
duty = duty_old - delta;
end
end
else
duty = duty_old;
end

%the below if limits the duty between min and max
if duty >= duty_max
duty=duty_max;
elseif duty<duty_min
duty=duty_min;
end

% stored data
duty_old=duty;
Vold=vpv;
Pold=P;
```

A.2. AlgorithmeMPPT Incrémentale Conductancesous Matlab

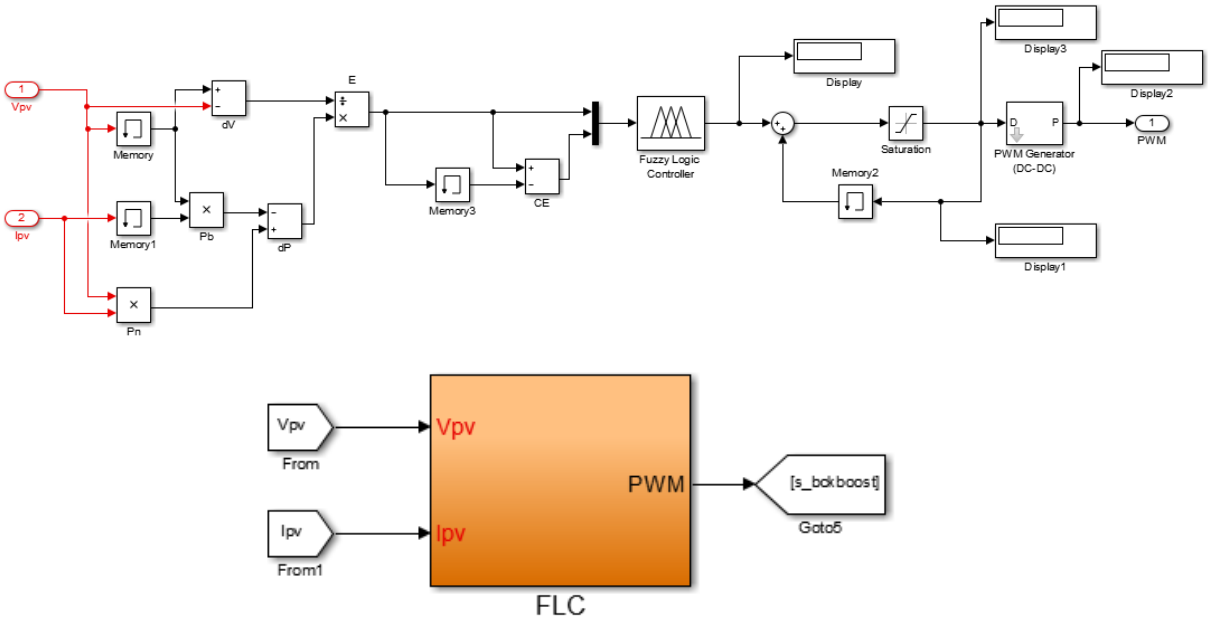


FigureA.2. Block delacommandeMPPT Incrémentale Conductance (INC) sous matlab.

- **l'algorithme de MPPT Incrémentale Conductance (INC) :**

```
function D = MPPT_IC(Vpv,Ipv)

del=0.000125;
do=0.1;
dmin=0;
dmax=0.95;

persistent Vold Dold Iold;

if isempty(Vold)
Vold=0;
Iold=0;
Dold=do;
end
dv=Vpv- Vold;
di=Ipv- Iold;

if dv == 0
if di== 0
D= Dold;
else
if di > 0
D = Dold - del;
else
D = Dold+del;
end
end
else
if di/dv == -(Ipv/Vpv)
D=Dold;

else
if di/dv > -(Ipv/Vpv)
D=Dold-del;
else
D=Dold+del;
end
end
end

% if D >dmax || D <= dmin
%     D=Dold;
% end

% data store
Dold=D;
Vold=Vpv;
Iold=Ipv;
end
```

A.3. Simulationdel'algorithmeMPPT basée sur la Logique flou



FigureA.4 : block dela commande MPPTflou.

Références bibliographies

[1] FEROUDJ Cylia et BENSADI Asma, "Gestion d'énergie d'un système hybride à énergies renouvelables en fonctionnement autonome avec stockages ", mémoire de master, Energies Renouvelables en Electrotechnique, Université A.MIRA-BEJAIA, 2018/2019

[2] Z. LAID, "étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau", thèse doctorat en Electrotechnique, Université de Constantine ,2010

[3] A. Tumma, V. Gade, P Balasubramanian, "Study on using maximum power point algorithms to improve the efficiency of solar energy storage for unmanned aerial vehicles," International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, ISSN: 2320-2084, vol. 1, Iss. 8, pp. 49-54, Oct-2013.

[4] L. Croci, "Gestion de l'´energie dans un syst`eme multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs ", Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013.

[5] M. Dahmane, 'Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome', Thèse doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2015

[6] Mr. Mati Chemseddine " Simulation et commande optimale d'un système de pompage d'énergie dans un système photovoltaïque" mémoire de master , Automatique , Commande des Processus Industriels ,Université Ferhat Abbas -Setif , Soutenu le /09/2012

[7] S. Vighetti," Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ", Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2010.

[8] Mr. Akassewa Tchapo SINGO" Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", thèse de doctorat , Génie Electrique, Ingénieur ENSEM, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Soutenue publiquement le 3 février 2010.

[9] A. Benjemaa, Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride. Thèse doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2015

[10] Mr. Belkaid Abdelhakim "Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome" Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas -Setif . 2015

[11] D. Abbes, "Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ", ThèseDoctorat, Université de Poitiers, 2012.

[12] Feyrouz Hadjiedj , Samira Hamironr , " Commande MPPT Avancée d'un Système photovoltaïque Autonome ", mémoire de master , Electronique , Energies renouvelable , Université de Jijel, 2016.

[13] T. Abdulkader, Modelling, ‘control and supervision of multi-source system connected to the network with a buffer storage of electrical energy via hydrogen vector’, These doctorate ,University de Technologies de Belfort–Montbéliard, 2015

[14] Mr. Mohammed Bouzghoub , .Amina Abadou " Etude et diagnostic d’un système photovoltaïque,", mémoire de master , Electronique , Energie renouvelable , Université de Jijel , 2016

[15] Akassewa Tchapo SINGO , " système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride

pour l’habitat énergétiquement autonome " , thèse de doctorat , Génie Electrique , l’Université Henri Poincaré, Nancy-I , le 3 février 2010.

[16] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. SadaSy ‘le pompage photovoltaïque Manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens’, 1998

[17] Boutlilis Fatima , " Modélisation et simulation des sources de production décentralisée

Application à l’intégration d’un générateur PV à stockage dans un réseau électrique " , thèse de doctorat , Électrotechnique , Énergie Renouvelable et développement durable , Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem , 2017/2018.

[18] M. A.Camara, "Modélisation du stockage de l’énergie photovoltaïque par super-condensateurs", thèse doctorat, Institut Polytechnique de CONAKRY – Université Gamal Abdel Nasser –Guinee, 2011

[19] O. BELAOUDMOU et A. BAHLOUL, "Etude et Commande d’un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau", mémoire de Master en Automatique, École nationale polytechnique, 2012

[20] E. Aitor, ‘ Microgrid Hybrid Energy Storage Integration and Three Level NPC converter’, Thèse doctorat, Université Bordeaux 1, 2012

[21], _____, https://www.energy.gov.dz/, Consulté le : 04 avril 2024

[22] M. Zandi ; “contribution au pilotage des sources hybrides d’énergie électrique “, Thèse Doctorat ; NANCY Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.

[23] M.G.VILLAVLA, J.R.GAZOLI, E.R.FILHO "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE transactions on power electronics, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009

[24] A.H.M Nordin, A.M.Omar, "Modeling and simulation of photovoltaic (PV) Array and Maximum Power Point Traker (MPPT) for Grid-connected PV System" 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment, Malaysia, 2011

[25] B. Madaci, R. Chenni, E. Kurt, K. E.Hemsas, “Design and control of a stand-alone hybrid power system”, International Journal of Hydrogen Energy, p. 1-1 2, 2016.

[26] M. AMMOUR et R. RIANE, "commande hybridepar logique floue d'un système hybride Eolien-Photovoltaïque-diesel pour une maison en site isolé", mémoire d'ingénieur d'état en automatique, École nationale polytechnique, 2011

[27] M. BILEL BEN NASSER, " Etude et modélisation de la commande MPPT avec Matlab ", Mémoire de Master, sciences appliquées, université du Québec à rimouski, Octobre 2021

[28] S. Charfi, M. Chaabene, "A comparative study of MPPT techniques for PV systems ", The fifth International Renewable Energy Congress IREC, March 25, 27, Hammamet, Tunisia, 2014.

[29] K. Nabil, 'Control of a Hybrid System Based PEMFC and Photovoltaic Panels', These doctorate, University Aix-Marseille, 2013

[30] Mr. OUARI Mondher et Mr. ZINE Yakoub ," Étude des commandes MPPT d'un système Photovoltaïque", Mémoire de Master, Ecole nationale Polytechnique , 07/07/2020

[31] M. Cherki Mohamed Souheil et Labraoui Mohamed ," Etude et comparaison des algorithmes MPPT dans les systèmes photovoltaïque ", mémoire de Master en automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2013

[32] D. A. R. Wati, W. B. Pramono, R. D.i G. Wibowo, "Design and implementation of fuzzy logic controller based on incremental conductance algorithms for photovoltaic power optimization, "Proceeding of International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application Inna Garuda Hotel, Yogyakarta, Indonesia, pp. 45-49, 6 -8 November 2012.

[33] M. Billel MORAKECHI, "Implémentation du contrôleur MPPT incrémental conductance sur carte FPGA. Application aux systèmes photovoltaïques", Mémoire de Master, Electronique, Université Saad Dahlab de Blida, 2012-2013

[34] C. L. Liu, J. H. Chen, Y. H. Liu and Z. Z. Yang "An asymmetrical fuzzy-logic-control-based MPPT algorithm for photovoltaic systems", *Journal of Energies*, 2177-2193, 1 April 2014

[35] B. Subudhi, R. Pradhan, "A Comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems, "IEEE Transaction sonsustainable energy, vol.4, no.1, 89-98, January 2013.

[36] S.Mohamed, E. Abdeslam, E. Rachid, "Maximum Power Point Tracker using Fuzzy Control for Photovoltaic System", International Journal of Emerging Research in Management &Technology , Iss.2278-9359, 2013.

[37] N. A. Bader, H. A. Khaled, J. F. Stephen, and B. W. Williams, "A maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic systems in microgrids,"IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, 1569-1606, April 2013.