

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DE TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES ALGORITHMES

P&O ET INC

POUR LA COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME

PHOTOVOLTAÏQUE

Présenté par :

- Saoudi Khaled Mounir
- Kebir Abdelkader
- Kebir Abdalah Elmouatassim

Soutenu le : ...25/06/2023.... Devant les Jures :

Mme. HAOUAM Imane	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
M. LAHCENE Mohamed Reda	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. BENMOHAMED Fayssal	MCB	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a accordées durant toutes ces années scolaires.

Nous remercions vivement nos parents pour leurs encouragements.

Nous remercions sincèrement notre superviseur : le Dr REDA LAHCEN pour son aide, son encouragement et son patience et leur conseil tout au long de ce travail. Sans oublier tous les professeurs de technologie qui ont contribué à notre étude.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous les membres du jury pour leurs gentilleses.

Nous tenons également à remercier tous nos proches et toutes les personnes qui nous ont aidés durant notre voyage d'étude.

Dédicaces

je dédie cet humble travail à mes chers parents, Yahia et Fadila qui m'ont soutenu le long de ma vie, je tiens à remercier aussi mes frères et sœurs, ainsi que mes neveux Yacine, Ghofrane, Maria, Jana, Alaa.

Je dédie à mes amis ; Hocine, Boudejmea, Houssam, Sid ahmed et

Djawed

ainsi je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail de

loin et ou de près.

Saoudi Khaled Mounir

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à mes chers parents, qui m'ont soutenu le long de ma vie, je tiens à remercier aussi mes frères et sœurs.

Je dédie à mes amis qui ont aidé à leur manière, Rahim Kebir, Aymen Boukhal, Jedi. Et tous ceux que j'ai oubliés.

Je remercie les enseignants qui nous ont guidés dans ce voyage, y compris notre encadreur.

Ainsi je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail de loin et ou de près.

KEBIR Abdelkader

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à mes chers parents, Abd elkader et Fatiha qui m'ont soutenu le long de ma vie, je tiens à remercier aussi mes frères ainsi

Je dédie à mes amis ; Rahim, hamo, arbi, alaa, tayf, hakou, aymen, ilyas..., et tous ceux que j'ai oubliés.

Ainsi je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail de loin et ou de près.

KEBIR Abdallah Elmouatassim

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Les centrales d'électricité à partir d'énergies renouvelables en Algérie 2015-2016. [5] ...	7
Tableau I.2 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie. [6]	8
Tableau I.3 : Caractéristique de chaque type de cellule. [20]	15

Chapitre II

Tableau II 1 : Récapitulatif du fonctionnement des hacheurs.	37
Tableau II 2 : Principe de l'algorithme P&O [33].....	42

Chapitre III

Tableau III 1 : Caractéristique du panneau utilisée.	53
Tableau III 2 : Paramètres de simulation.....	54
Tableau III 3 : Comparaison de deux techniques MPPT.	65

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Production mondiale d'électricité en 2020.....	3
Figure I.2 : Production primaire d'énergies renouvelables.....	4
Figure I.3 : Projection à l'horizon 2050 des capacités cumulées de solaire photovoltaïque installées par région dans le monde.	4
Figure I.4 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque, 2006–2018.....	5
Figure I.5 : Capacité d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde en 2018, selon les 10 premiers pays.	5
Figure I.6 : Evolution estimée du parc national de production d'électricité.....	7
Figure I.7 : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh.	8
Figure I.8 : Potentiel solaire en Algérie.	9
Figure I.9 : Durée moyenne d'ensoleillement.....	9
Figure I.10 : (a) : Gisement solaire de l'Algérie ;(b) : Energie solaire globale reçue par jour sur une surface d'un m ²	10
Figure I.11 : Le rayonnement solaire.	10
Figure I.12 : Les composants de rayonnement solaire.....	12
Figure I.13 : Fonctionnement de cellule photovoltaïque.	13
Figure I.14 : Cellule monocristalline.	13
Figure I.15 : Cellule Polycristalline.....	14
Figure I.16: Cellule amorphe.	14
Figure I.17 : Cellules identiques en série (ns).....	15
Figure I.18 : Cellules identiques en parallèle (np).	16
Figure I.19 : Cellules identiques résultantes de série-parallèle groupement.....	16
Figure I.20 : Module PV de Np branches parallèles et Ns cellule en séries.	17
Figure I.21 : Un générateur Photovoltaïque.....	18
Figure I.22 : Modèle d'une cellule réelle.....	20
Figure I.23 : Caractéristique Courant-Tension.....	22
Figure I.24 : Caractéristique Puissance-Tension.....	23
Figure I.25 : Caractéristique I-V avec variation d'éclairement.....	24
Figure I.26 : Caractéristique P-V avec variation d'éclairement.....	24
Figure I.27 : Caractéristique I-V avec variation de température.....	25
Figure I.28 : Caractéristique P-V avec variation de température.....	25

Chapitre II

Figure II.1 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	29
Figure II.2 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.....	29
Figure II.3 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC.....	30
Figure II.4 : Schéma de base d'un convertisseur buck.....	31
Figure II.5 : Formes d'ondes des courants et tension du convertisseur buck.....	31
Figure II.6 : Schéma de base d'un convertisseur boost.....	32
Figure II.7 : Formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseur boost.....	32
Figure II.8 : Circuit équivalent de boost quand K est fermée.....	33
Figure II.9 : circuit équivalent de boost quand K est ouvert.....	33
Figure II.10 : Schéma de base d'un convertisseur buck boost.....	34
Figure II.11 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur buck – boost.....	35

Figure II.12 : circuit équivalent du buck- boost quand l'interrupteur est fermé.....	35
Figure II.13 : Circuit équivalent du buck – boost quand l'interrupteur est ouvert.....	36
Figure II.14 : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge RS (B).	38
Figure II.15 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	38
Figure II.16 : Classification de la technique MPPT couramment utilisée.....	39
Figure II.17 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).	41
Figure II.18 : Divergence de la méthode P&O.	41
Figure II.19 : l'algorithme de P&O classique.	42
Figure II.20 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G.....	43
Figure II.21 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance (INC).....	44
Figure II.22 : Algorithme type de la commande Hill Climbing	45
Figure II.23 : Organigramme de l'algorithme FCO.	46
Figure II.24 : Organigramme de l'algorithme FCC.	48

Chapitre III

Figure III.1 : Bibliothèque de SIMULINK.	52
Figure III.2 : Modèle de panneau PV.	53
Figure III.3 : Modélisation sous MATLAB du panneau PV.....	54
Figure III.4 : Modélisation de l'hacheur Boost.	54
Figure III.5: Schéma block de la commande MPPT P&O.....	55
Figure III.6: Schéma block de la commande MPPT INC.	55
Figure III.7: Schéma globale de GPV et hacheur commandé par MPPT.....	56
Figure III.8: Courbe de courant en fonction du temps avec variation d'éclairement (P&O).....	56
Figure III.9: Courbe de tension en fonction du temps avec variation d'éclairement (P&O).	57
Figure III.10: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation d'éclairement (P&O).	57
Figure III.11: Courbe de courant en fonction du temps avec variation de température (P&O).	58
Figure III.12: Courbe de tension en fonction du temps avec variation de température (P&O).	58
Figure III.13: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation de température (P&O).	59
Figure III.14: Courbe de courant en fonction du temps avec variation de d'éclairement (INC).	59
Figure III.15: Courbe de tension en fonction du temps avec variation de d'éclairement (INC).....	60
Figure III.16: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation de d'éclairement (INC).....	60
Figure III.17: Courbe de courant en fonction du temps avec variation de température (INC).	61
Figure III.18: Courbe de la tension en fonction du temps avec variation de température (INC).....	61
Figure III.19: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation de température (INC).....	62
Figure III.20: Allure de comparaison du courant de sortie entre P&O et INC.	62
Figure III.21: Allure de comparaison du tension de sortie entre P&O et INC.	63
Figure III.22: Allure de comparaison du puissance de sortie entre P&O et INC.	63
Figure III.23: Allure de comparaison du puissance de sortie entre P&O et INC.	64
Figure III.24: Comparaison entre P&O et INC.	64
Figure III.25: Allure de comparaison de signal du gâchette entre P&O et INC.	65

Liste des Symboles

Symboles	Nomination	Unité
I	Courant	(A)
I_{ph}	Le photo-courant	(A)
I_{cc} ,	Le courant de court-circuit du panneau (Short Circuit)	(A)
I_D	Le courant de diod	(A)
I_{PV}	Le courant de panneau photovoltaïque	(A)
I_{MPP} ,	Courant au point de puissance maximale ou optimale	(A)
V	Tension	(V)
V_{PV}	Tension de panneau photovoltaïque	(V)
V_{ref}	Tension de référence pour laquelle de PV est forcé à fonctionner	(V)
V_s	Tension de sortie du convertisseur	(V)
V_{MPP} ,	Tension au point de puissance maximale ou optimale	(V)
V_{co} ;	Tension de circuit ouvert	(V)
R_S	Résistance série	(Ω)
R_{sh}	Résistance parallèle	(Ω)
Q	Charge électrique	(1.6×10^{-19} C)
K	Constante de Boltzmann	(1.3854×10^{-23} J/K)
α, D	Rapport cyclique du hacheur	
L	Inductance de hacheur	(H)
C	Capacité de hacheur	(F)
P	Puissance	(W)
P_{max}	Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque	(W)
P_{mpp}	Puissance au point de puissance maximale	(W)
f	la fréquence de découpage	(Hz)
G	Eclairement	(W/m ²)
V_e	Tension d'entrée du convertisseur	(V)

Liste des abréviations

Abréviations	Nomination
GPV	Générateur photovoltaïque.
PV	Photovoltaïque.
PPM	Point de Puissance Maximale.
MPPT	Maximum power point tracking
DC	Courant continu.
DC/DC	Continue / Continue
P&O	Perturbation et Observation.
Inc-Cond	Incrémentation de conductance.
STC	Standard Test Condition.
G	Eclairement
L	Inductance
C	Capacitté
D	Rapport cyclique.
Wc	watt-crête
MOSFET	Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension
DA	Dinar Algérienne
ΔV_{pv}	Variation de la tension
ΔI_{pv}	Variation de le courant

Tableau des Matières:

<i>Remerciement</i>	
<i>Dédicaces</i>	
<i>Liste des Tableau</i>	
<i>Liste des Figures</i>	
<i>Liste des symboles et abréviations</i>	
Introduction Générale	I
Chapire I: États de l'Art Sur Les systèmes Photovoltaïque	
I.1. Introduction :.....	2
I.2. Situations Energetiques :.....	2
I.2.1. La Potentiel Solaire En Algerie :.....	5
I.3. Rayonnement Solaire :.....	10
I.3.1. Le rayonnement direct :	11
I.3.2. Le rayonnement diffus :	11
I.3.3. Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo :	11
I.3.4. Le rayonnement global :.....	11
I.4. Les Cellules Photovoltaïques :	12
I.4.1. Le Fonctionne D'une Cellule Photovoltaïque :.....	12
I.4.2. Les Types Du Cellules Photovoltaïques :.....	13
I.4.3. Assemblage des modules photovoltaïques :	15
I.5. Le Module Photovoltaïque :	17
I.6. Le Generateur Photovoltaïque :	17
I.7. Parametres d'une Cellule Photovoltaïque :	18
I.7.1. Tension en circuit ouvert :.....	18
I.7.2. Courant de court-circuit :	18
I.7.3. Puissance-tension :	18
I.7.4. Courant-tension :	19
I.7.5. Facteur de forme :.....	19
I.7.6. Le rendement :	19
I.8. Modelisaion d'une Cellule Photovoltaïque :	20
I.9. Identification des paramètres dans les conditions standards STC :.....	21
I.10. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :.....	22
I.11. influence de la temperature et l'eclaircement :	24
I.12. conclusion :	26
Chapire II: Les convertisseurs DC-DC(Hacheur) et la commande Maximum power point tracker (MPPT)	
II.1. Introduction :.....	28
II.2. Convertisseur DC-DC (Hacheur) :	28
II.3. Connexion Direct Generateur Photovoltaïque-Charge :.....	29
II.4. Types Des Convertisseurs DC-DC :.....	30
II.4.1. Convertisseur Buck :.....	30

II.4.2.	Convertisseur boost :	32
II.4.3.	Convertisseur buck-boost :	34
II.5.	Definition et Principe De La Commande MPPT :	37
II.6.	Classification De La Commande MPPT :	38
II.6.1.	Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrée du Convertisseur :	39
II.6.2.	Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres sortis Convertisseur ...	39
II.7.	Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :	40
II.7.1.	MPPT Direct :	40
II.7.1.1.	Méthode perturbation et observation (P&O) :	40
II.7.1.2.	Méthode d'incrémentatation de la conductance (INC) :	43
II.7.1.3.	La méthode "Hill Climbing" :	45
II.7.2.	MPPT Indirectes :	46
II.7.2.1.	Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension (Vco) :	46
II.7.2.2.	Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant (Icc) :	47
II.8.	Conclusion :	49
Chapire III: <i>Simulation et Discussion</i>		
III.1.	Introduction :	51
III.2.	Outils de MATLAB/SIMULINK :	51
III.3.	Simulation De Systeme :	53
III.3.1.	Simulation de PV :	53
III.3.2.	Simulation de convertisseur DC-DC Boost :	54
III.3.3.	Les Algorithmes de MPPT étudié :	55
III.4.	Resultats Et Discussion :	56
III.4.1.	P&O :	56
III.4.1.1.	Défèrent éclairment :	56
III.4.1.2.	Défèrent température :	58
III.4.2.	INC :	59
III.4.2.1.	Défèrent éclairment :	59
III.4.2.2.	Défèrent température :	61
III.5.	Comparaison EntrE INC Et P&O :	62
III.6.	Conclusion :	66
<i>Conclusion générale</i>		67
<i>Références bibliographiques</i>		69
<i>Annexes</i>		74
<i>Résumé</i>		80

Introduction Général

Introduction Générale

L'énergie est un élément essentiel et important dans la vie humaine en raison de son exploitation dans plusieurs domaines productifs, où l'électricité est considérée comme l'un des plus importants de ces domaines dans lesquels l'énergie est exploitée, car les gens en dépendent dans divers domaines, en raison de son des usages profonds dans l'industrie et la production, et cette énergie s'est diversifiée et ses sources de production se sont diversifiées, ses débuts ont été avec l'énergie fossile, qui repose sur le charbon et le pétrole, et il y a l'énergie du combustible nucléaire, où l'électricité est produite dans des réacteurs nucléaires grâce à la fission nucléaire. Pour éviter ou réduire la gravité de ces risques, les énergies dites alternatives ou renouvelables sont apparus, qui étaient dans les années soixante du siècle dernier (20).

Les énergies renouvelables se distinguent par leur caractère propre et permanent, contrairement aux énergies non renouvelables et dépendent de ressources naturelles renouvelables telles que le vent et le soleil. Ces énergies se répartissent en plusieurs catégories (énergie éolienne, thermique, et solaire). Notre étude est l'énergie solaire car c'est la meilleure et la plus pure énergie disponible de manière durable et elle est exploitée par des panneaux photovoltaïques. Que ce dernier soit affecté négativement par le climat, qui est le principal facteur de production de la puissance, elle fluctue donc en raison du changement de température et de l'intensité de l'éclairage, ce qui a conduit à la recherche d'un moyen de contrôler et d'améliorer la puissance, et cette recherche a conduit à l'émergence de ce qu'on appelle le suivi du point de force maximum (MPPT).

Dans cette recherche, nous étudierons une comparaison entre les deux algorithmes MPPT, perturbation et observation (P&O) et incrémentation de la conductance INC pour définir le meilleur algorithme entre c'est deux.

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par définir les concepts généraux de l'énergie solaire, ainsi que les bases des panneaux photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, il s'agissait d'une étude générale sur les types de convertisseurs statiques DC-DC (Hacheur) utilisés dans la conversion photovoltaïque, ainsi qu'un aperçu des types d'algorithmes directs et indirects pour MPPT et plus de précisions sur les algorithmes perturbation et observation (P&O) et incrémentation de la conductance (INC).

Dans le dernier chapitre, nous effectuons des simulations en utilisant le programme MATLAB SIMULINK pour les algorithmes P&O et INC, et ont analysé les résultats obtenus et ont fait une comparaison entre ces deux algorithmes.

Chapitre I :

États de l'Art Sur

Les systèmes Photovoltaïque

I.1. Introduction :

Tout au long de l'histoire, l'homme avait besoin d'énergie pour le fonctionnement et le besoin, ce qui l'a poussé à obtenir et à rechercher ses sources et ses méthodes d'extraction, alors qu'il avait été façonné et formé de temps en temps jusqu'aux temps modernes où les hommes recherchent des sources qui compensent les sources fossiles en raison de leur émission de CO₂ et des problèmes qu'elle occasionne à l'environnement.

Cela étant dit, cette nouvelle source d'énergie est plus durable et inoffensive pour la nature qui pourrait durer des générations, en particulier l'énergie solaire.

La première fois que l'effet photovoltaïque a été introduit remonte à 1839 en français par le physicien ALEXANDRE BECKERT il a découvert qu'il était possible de transférer l'énergie lumineuse en électricité, ce phénomène est basé sur la technologie des semi-conducteurs. Il se produit lorsqu'un électron est libéré en raison de l'énergie photonique générant une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui devient une source de courant électrique continu. Il a d'abord été utilisé dans les années 1960 sur les équipements satellitaires spatiaux. 1970, les premières utilisations terrestres concernaient l'électrification de sites isolés.

Dans ce chapitre nous exploitons quelques notions de base essentielles dans le domaine photovoltaïque, nous aborderons ainsi les notions sur la source d'énergie photovoltaïque et les installations photovoltaïques et l'effet de la température et de l'irradiation.

I.2. Situations Energétiques :

En 2020, les énergies fossiles représentent encore 83,1% du mix énergétique mondial (contre 84,3% en 2019 et 84,7% en 2018) et indiquent que pour 71,3% de la production mondiale d'électricité, sachant que la consommation mondiale d'électricité est de 26,823 TWh, le charbon reste de loin la principale source d'électricité dans le monde : ce combustible représente 35,1 % de la production mondiale d'électricité (2020).[1]

Dans l'ensemble, la demande et la consommation mondiale d'électricité ont été considérablement affectés par la pandémie de COVID-19 en 2020, les changements dans les modes de production et de consommation d'électricité reflétant les perturbations sans précédent de l'économie et de la société mondiales.

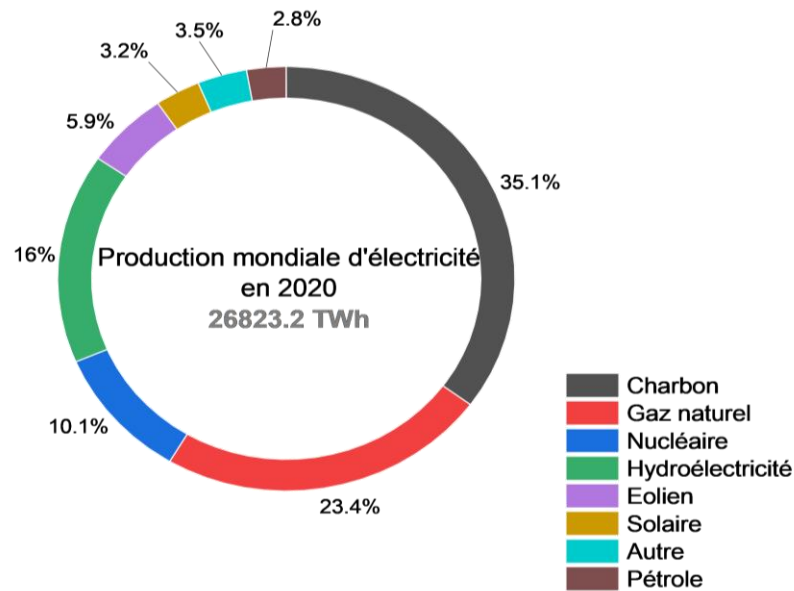


Figure I.1 : Production mondiale d'électricité en 2020. [1]

En termes de production d'énergie renouvelable, la capacité mondiale actuelle est de 2 799 GW, dont l'hydroélectricité est la source la plus importante avec une capacité de 1 211 GW. Toutefois, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont en train de rattraper leur retard et devenir des sources importantes de production d'énergie renouvelable. Les principales filières restent la biomasse (34,3 %), l'hydraulique renouvelable (19,3 %), l'éolien (12,7 %), les pompes à chaleur (10,1 %) et les biocarburants (8,4 %), le solaire (4,9%) qui regroupe les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques, la géothermie (1,7%) et les énergies marines (0,1%).[2]

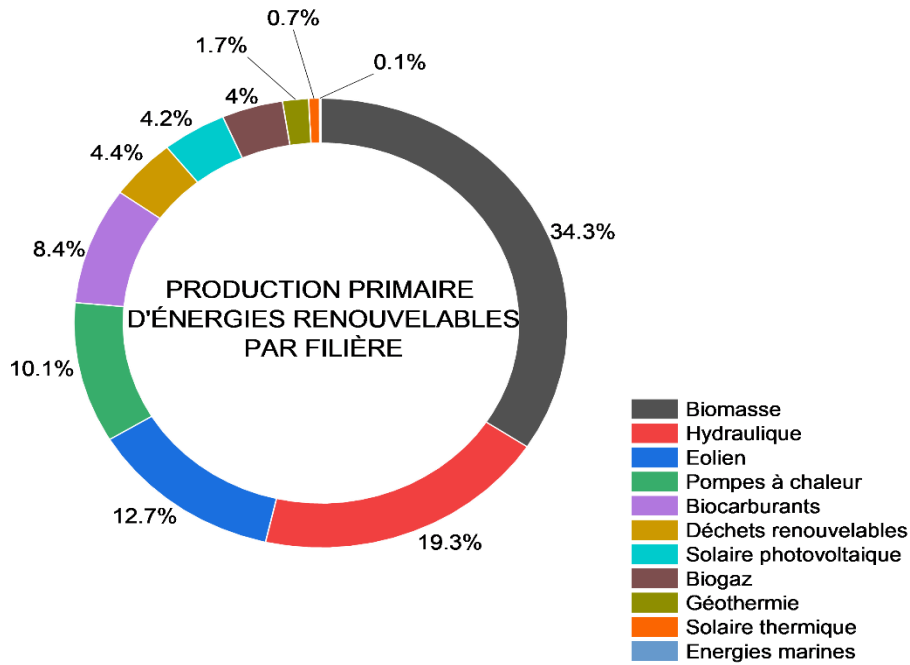


Figure I.2 : Production primaire d'énergies renouvelables. [2]

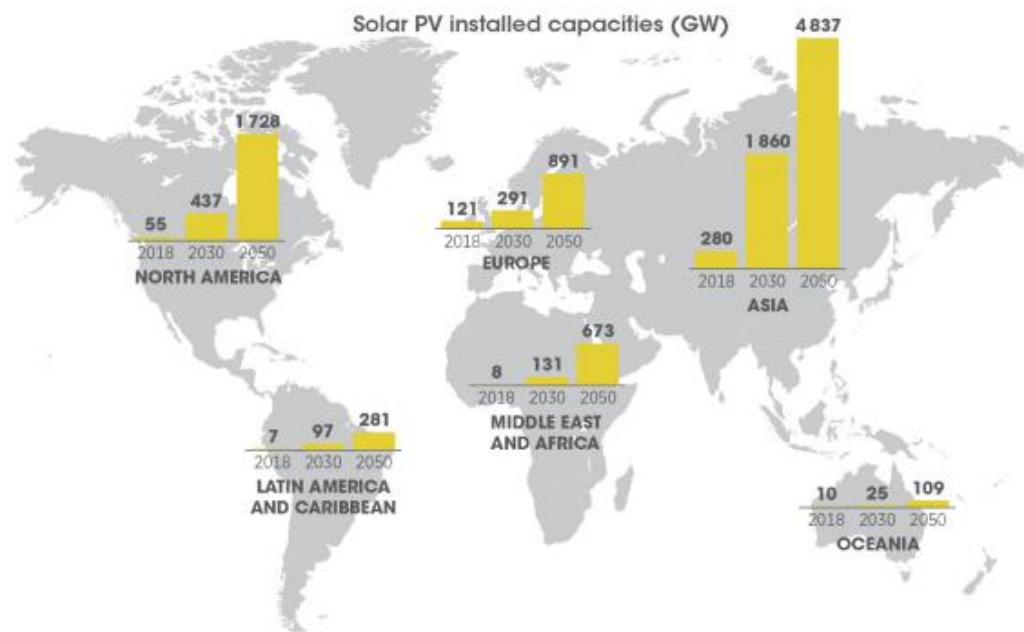


Figure I.3 : Projection à l'horizon 2050 des capacités cumulées de solaire photovoltaïque installées par région dans le monde. [3]

Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque, 2006–2018

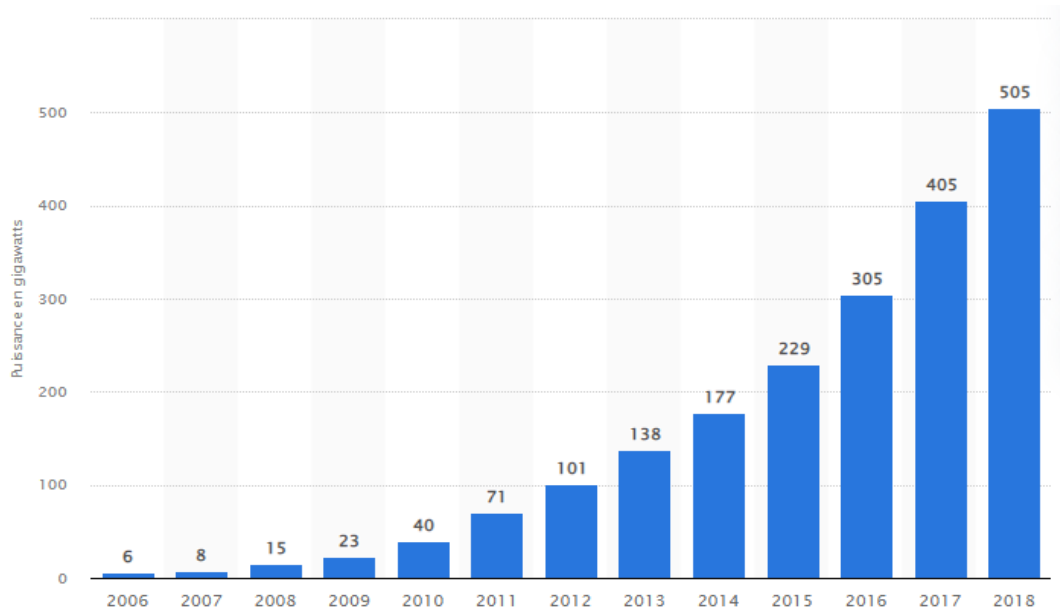


Figure I.4 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque, 2006–2018. [4]

La capacité et ajouts solaires photovoltaïques des 10 premiers pays, 2018 est représenté dans la figure suivant :

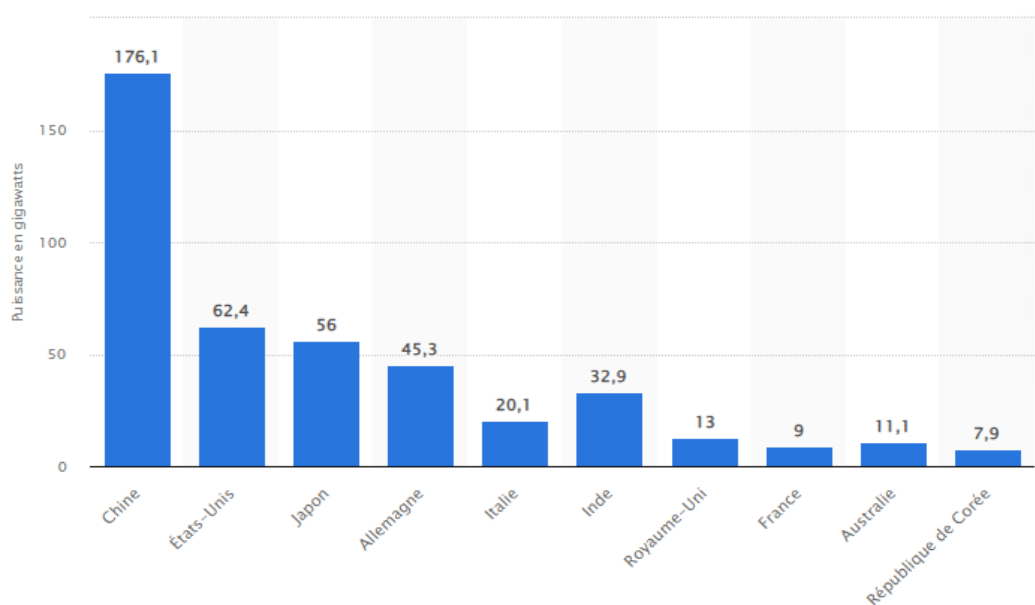


Figure I.5 : Capacité d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde en 2018, selon les 10 premiers pays. [4]

1.2.1. La Potentiel Solaire En Algérie :

L'Algérie joue un rôle clé dans les marchés mondiaux de l'énergie en tant que producteur et exportateur de gaz naturel et de gaz naturel liquéfié. Le mix énergétique de l'Algérie en 2010 a été presque exclusivement basé sur les combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel (93%). Cependant, le pays a un énorme potentiel d'énergie renouvelable,

principalement solaire, dont le gouvernement est (ou devrait) en essayant de l'exploiter en lançant un programme d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique ambitieux.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, dont 12 000 MW seront destinés à la consommation interne et le reste pour l'exportation. Le programme est axé sur le développement et l'expansion de l'utilisation des ressources renouvelables, comme l'énergie solaire, le vent, la biomasse, la géothermie et l'hydroélectricité, afin de diversifier les sources d'énergie et promouvoir le développement durable du pays

Les projets des énergies renouvelables pour la production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en trois phases :

- Phase 2011-2013 : pour tester les différentes filières d'énergies renouvelables Comme exemples de projets pilotes, on peut citer la station photovoltaïque de 1MWc à Oued N'chou, 10km au nord de la commune de Ghardaïa, réalisée sur une superficie de 10 hectares, pour un coût global de près de 900 millions de DA, cette mini-centrale est composée de 6000 modules photovoltaïques de différentes technologies ainsi que la station de 10 MW à Adrar, composée de 12 éoliennes.
- Phase 2014-2015 : déploiement du programme électricité renouvelable et la construction des équipements.

Une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;

- Phase 2016-2020 : déploiement à grande échelle.

Environ 60 centrales solaires photovoltaïques, en se concentrant sur les centrales solaires, parcs éoliens ainsi que des centrales électriques hybrides qui doivent être construites au cours des dix prochaines années. [5]

Capacités des centrales entrées en service en 2015	Capacités des centrales entrées en service en 2016	Capacités des centrales à mettre en service avant fin 2016
Djanet (illizi) 3 MW Adrar (Adrar) 20 MW Kaberten (Adrar) 3 MW Tamanrasset (Tamanrasset) 13 MW Tindouf (Tindouf) 9 MW	Aoulef (Adrar) 5 MW Z.Kounta (Adrar) 6 MW Timimoune (Adrar) 9 MW Reggane (Adrar) 5 MW In Salah (Tamanrasset) 5 MW Ain Albel (Djelfa) 20 MW Telagh (Sidi-Bel-Abbes) 12 MW Sedrate Leghzel (Naama) 20 MW Ain Skhouna (Saïda) 30 MW El Khnag (Laghouat) 20 MW Oued El Kebrit (Souk Ahras)	Aïn Al Bel (Djelfa) 33 MW Laghouat 40 MW Oued El Ma (Batna) 2 MW Labiodh Sidi Chikh (El Bayadh) 23 MW Aïn El Melh (M'sila) 20 MW El Hedjira (Ouargla) 30 MW
TOTAL— 48 MW	TOTAL— 147 MW	TOTAL— 148 MW
		TOTAL GENERAL : 343 MW

Tableau I.1 : Les centrales d'électricité à partir d'énergies renouvelables en Algérie 2015-2016. [5]

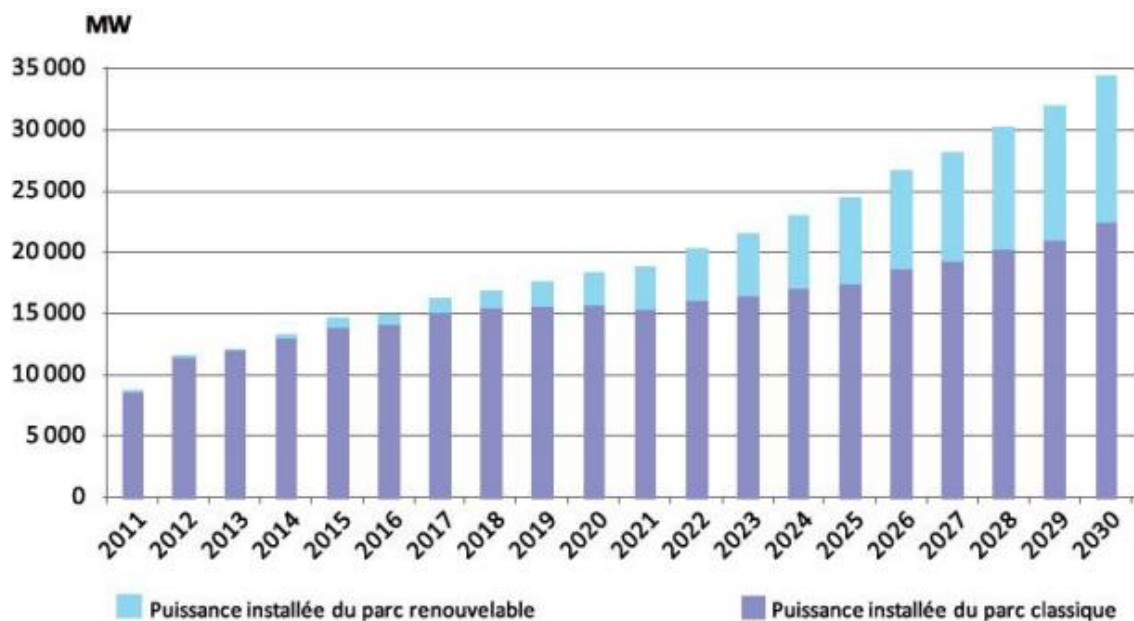


Figure I.6 : Evolution estimée du parc national de production d'électricité. [3]

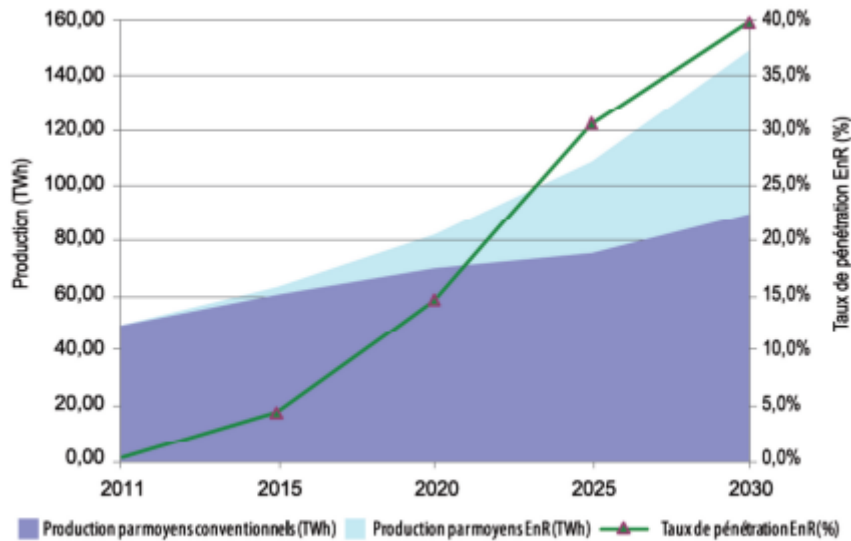


Figure I.7 : Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh. [5]

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m^2 soit près de 3 KWh/ m^2/j au nord et dépasse 5,6 KWh/ m^2/j au Grand Sud. En conséquence, nous voyons que l'Algérie dispose d'une énergie solaire abondante et d'un grand potentiel si elle est exploitée à des fins économiques, et nous l'expliquons à travers le tableau ci-dessous.[6]

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

Tableau I.2 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie. [6]

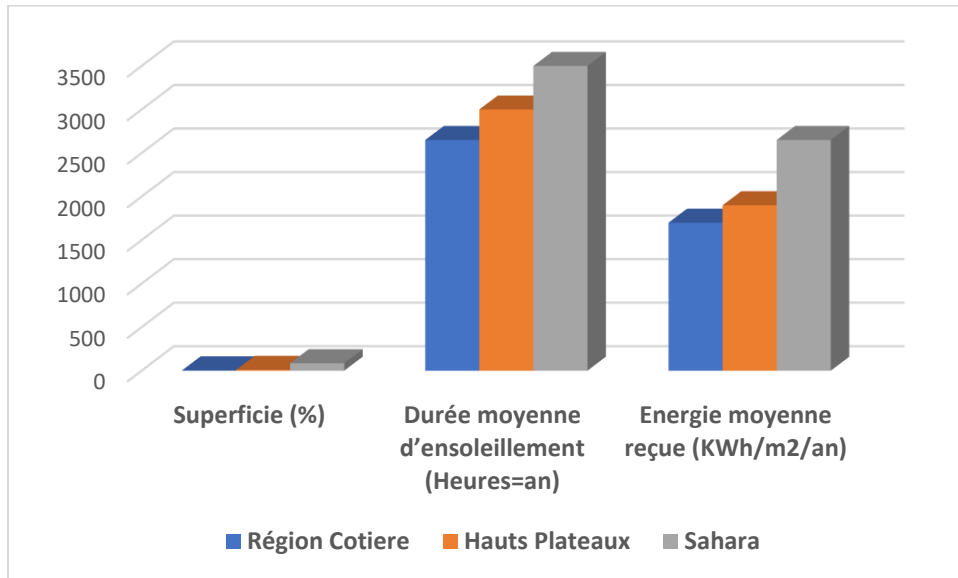


Figure I.8 : Potentiel solaire en Algérie.

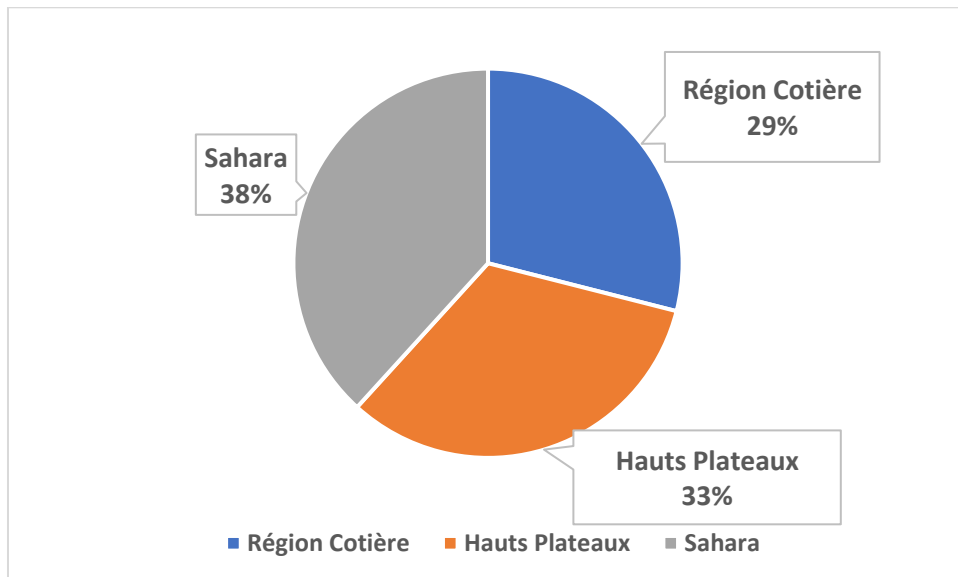


Figure I.9 : Durée moyenne d'ensoleillement.

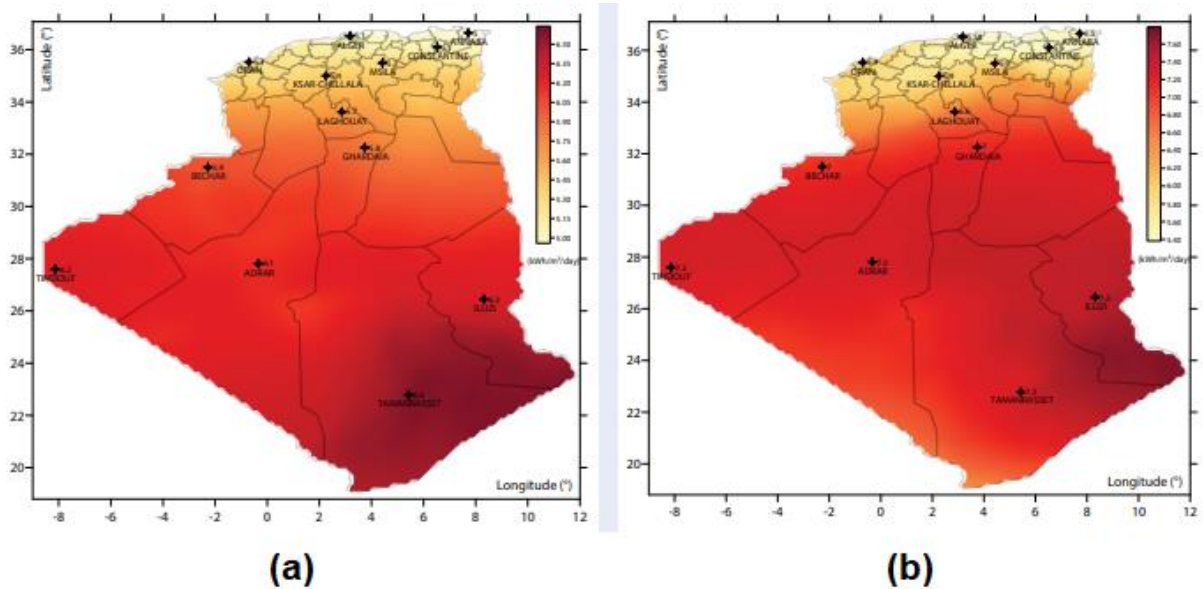


Figure I.10 : (a) : Gisement solaire de l'Algérie ;(b) : Energie solaire globale reçue par jour sur une surface d'un m2. [3]

I.3. Rayonnement Solaire :

Seulement une infime partie de l'énergie solaire qui est émise dans l'espace par le soleil et qui est constamment rejetée dans notre système solaire est captée par la Terre. La constante solaire, qui est de 1367 W/m^2 , représente la quantité moyenne d'énergie transmise par le soleil à chaque mètre carré de l'atmosphère terrestre sur une distance de 150 millions de kilomètres. La quantité d'énergie qui atteint la surface de la Terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère, qui est mesurée par l'indice de masse AM.

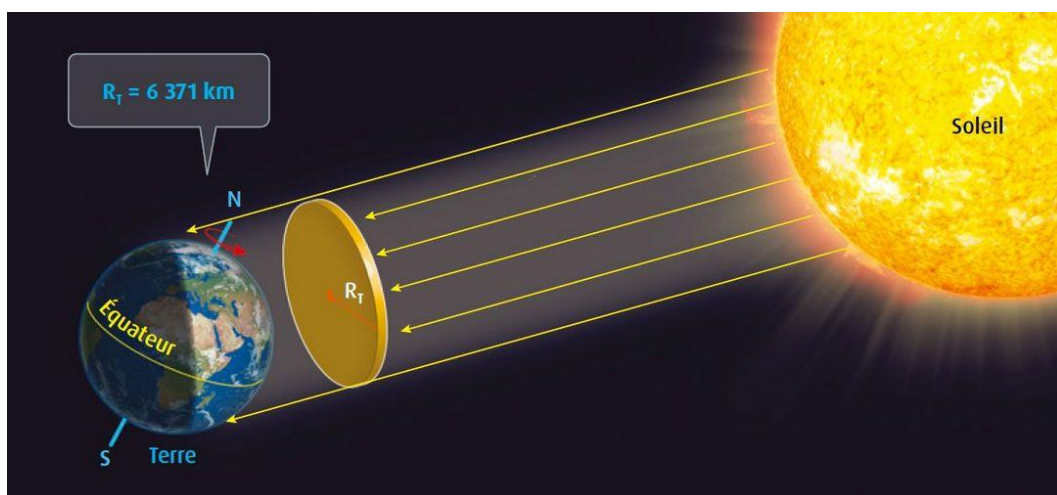


Figure I.11 : Le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire qui parvient à la surface de la mer dans un ciel clair à midi est de 1000 W/m^2 , et il est appelé le rayonnement de masse d'air « 1 » (ou AM1). La perte d'énergie est plus importante lorsque le soleil descend dans le ciel, car la lumière doit traverser une plus grande distance dans l'air. Étant donné que le soleil ne se trouve au zénith que pendant de

courtes périodes, la masse d'air est plus importante en permanence, ce qui signifie que l'énergie disponible est inférieure à 1000 W/m^2 . [7]

I.3.1. Le rayonnement direct :

Rayonnement reçu directement du soleil qui n'est pas diffusé par l'atmosphère, ces rayons sont parallèles les uns aux autres, ils forment donc des ombres et peuvent être focalisés par des miroirs et mesurés à l'aide d'un pyréliomètre. [8]

I.3.2. Le rayonnement diffus :

Le rayonnement constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols), la diffusion est le phénomène, qui distribue un faisceau parallèle, dans une multitude de faisceaux, laissant dans toutes les directions du ciel, ceux-ci sont aux deux molécules d'air, gouttelettes d'eau (nuages) et la poussière sont responsables de cette diffusion des rayons solaires, elle dépend principalement des conditions météorologiques. [8]

I.3.3. Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et peut être significatif lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.).

Le rayonnement retourné à l'atmosphère résulte de la réflexion de la lumière du sol ou d'objets à la surface du sol. L'intensité de ce rayonnement dépend de l'albédo du sol, qui est sa capacité à réfléchir la lumière. Dans les situations où le sol est très réfléchissant, comme l'eau ou la neige, ce rayonnement peut être particulièrement important. [9]

I.3.4. Le rayonnement global :

Une surface horizontale : C'est la quantité totale de lumière solaire qui atteint une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et diffus. [9]

Une surface inclinée : Le rayonnement global sur une surface inclinée est la somme du rayonnement : direct, diffus et réfléchi. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. [10]

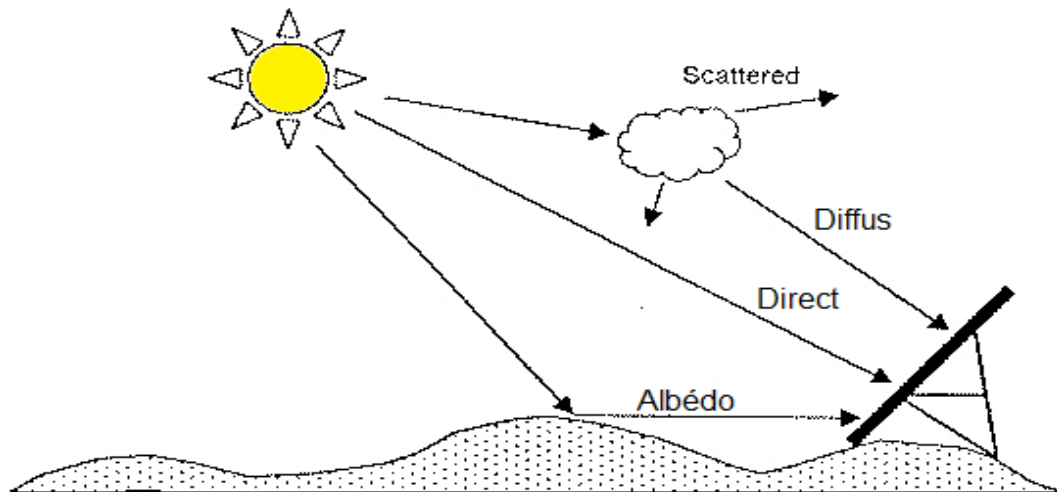


Figure I.12 : Les composants de rayonnement solaire. [11]

I.4. Les Cellules Photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque fonctionne en exploitant l'effet photovoltaïque, qui génère une force électromotrice lorsqu'elle est exposée à la lumière. La tension produite dépend du matériau utilisé, de sa disposition, de la température et du vieillissement de la cellule [12], et peut varier entre 0,3 et 0,7 volts. Cette technologie est basée sur l'utilisation de semi-conducteurs, qui permettent de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Becquerel [13]. Les cellules photovoltaïques sont construites en utilisant des semi-conducteurs, qui ont des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque est une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction), qui permet de créer un champ électrique interne.[14]

I.4.1. Le Fonctionne d'une Cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque fonctionne en utilisant un matériau semi-conducteur. Lorsque les semi-conducteurs (généralement en silicium) sont exposés à la lumière, les électrons de la couche de valence ont tendance à se détacher, créant une faible différence de potentiel. Cependant, cela ne crée pas de courant électrique, qui nécessite un flux d'électrons dans une direction spécifique. Pour obtenir ce courant, le semi-conducteur doit être dopé.

Le dopage d'un semi-conducteur consiste à créer un excédent d'électrons d'un côté et un déficit d'électrons de l'autre, créant une différence de potentiel qui fait circuler les électrons de la borne négative (qui a un excédent d'électrons) à la borne positive (qui a un déficit d'électrons). Une cellule photovoltaïque est constituée de deux couches, formant une jonction PN. La couche exposée à la lumière est dopée avec un matériau de type N pour créer un excédent d'électrons (par exemple, du phosphore avec cinq électrons sur sa dernière couche qui peuvent libérer un électron). La couche inférieure est dopée avec un matériau de type P pour créer un

déficit d'électrons (par exemple, du bore avec seulement trois électrons sur sa dernière couche, ce qui l'amène à capturer un électron du matériau environnant).

Cela crée un courant électrique qui circule lorsque la lumière du soleil frappe la cellule, entraînant le mouvement des électrons dans le semi-conducteur et ainsi la création d'un courant. [13]

Ce fonctionnement est résumé dans la figure I.15 ci-dessus :

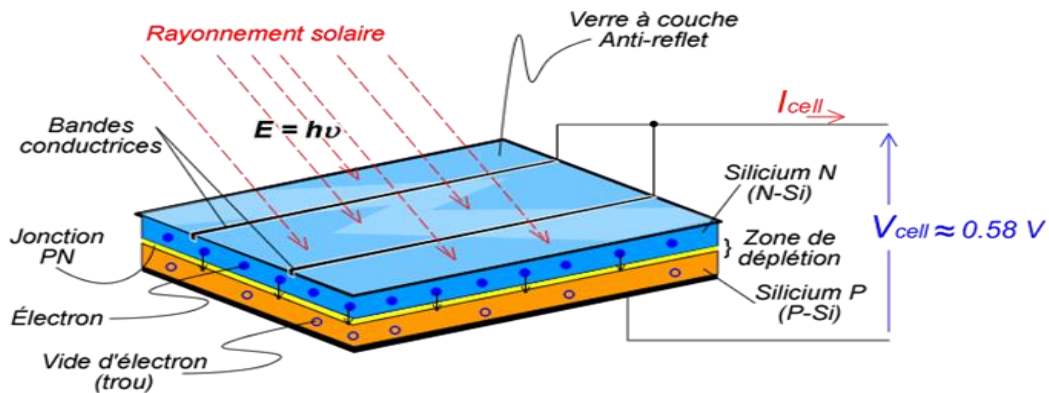


Figure I.13 : Fonctionnement de cellule photovoltaïque. [15]

I.4.2. Les Types des Cellules Photovoltaïques :

Cellules monocristallines : Une cellule monocristalline est une cellule résultant d'un bloc de silicium cristallisé dans un seul cristal. Ce type de cellule est rond, parfois presque carré, avec une couleur uniforme. Les panneaux de cellules monocristallines ont une efficacité de 14-18%. Leur méthode de production reste complexe et coûteuse (il faut beaucoup d'énergie pour obtenir du cristal de silicium pur), donc ces panneaux sont chers. [16]

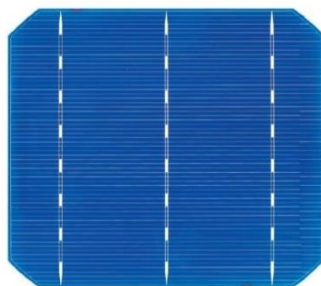


Figure I.14 : Cellule monocristalline. [17]

Cellules polycristallines : Les cellules polycristallines proviennent d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Elles présentent souvent une apparence rectangulaire. Les panneaux solaires à cellules polycristallines ont une efficacité inférieure à celle des panneaux monocristallins (de 11 à 15%). Étant donné que leur coût de production est plus faible, elles offrent le meilleur rapport qualité-prix. [16]

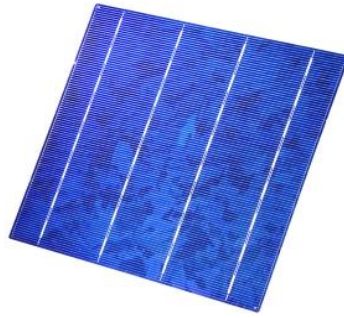


Figure I.15 : Cellule Polycristalline. [18]

Les cellules photovoltaïques amorphes : sont produites à partir d'un gaz de silicium, qui est projeté sur le verre, le plastique mou ou le métal par un processus de vaporisation sous vide. Cette technologie permet l'utilisation de couches très fines de silicium. Les cellules photovoltaïques amorphes sont plus économiques à produire que leurs prédécesseurs, mais leur efficacité n'est que de 7 à 9%. [16]



Figure I.16: Cellule Amorphe. [19]

Matériaux	Rendement	Durabilité	Caractéristiques	Principales Utilisations
Silicium Monocristallin	14 à 18% (24,7% en Laboratoire)	20 à 30 ans	- Très performant - Stabilité de production - Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades...
Silicium Poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	- Adapté à la production à grande échelle. - Stabilité de production. - Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
			- Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. - Fonctionnement si faible luminosité. - Fonctionnement par temps couvert. – La	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Amorphe	5 à 9% (13% en laboratoire)	20 à 30 ans	puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	
---------	--------------------------------	-------------	--	--

Tableau I.3 : Caractéristique de chaque type de cellule. [20]

I.4.3. Assemblage des modules photovoltaïques :

Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc}$$

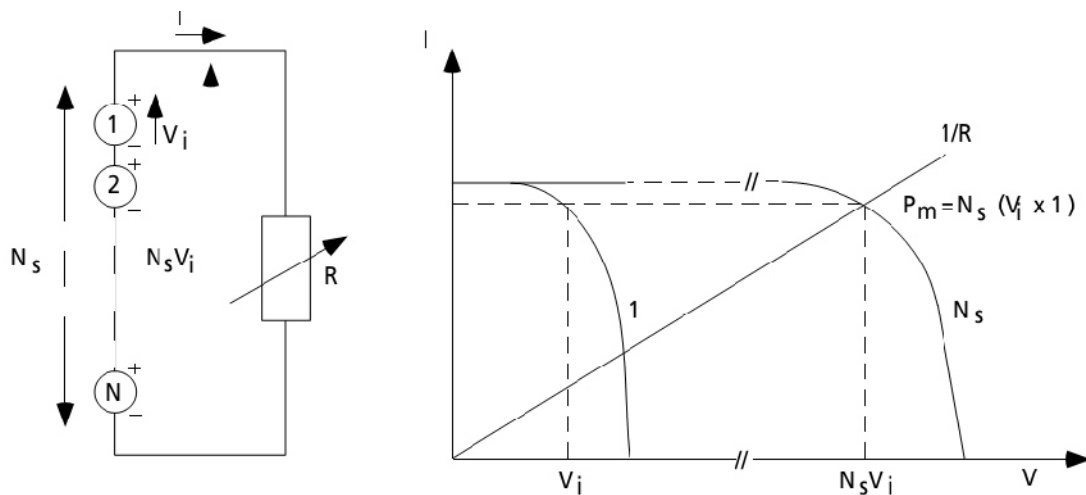


Figure I.17 : Cellules identiques en série (ns). [20]

Association en parallèle :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \tag{I.01}$$

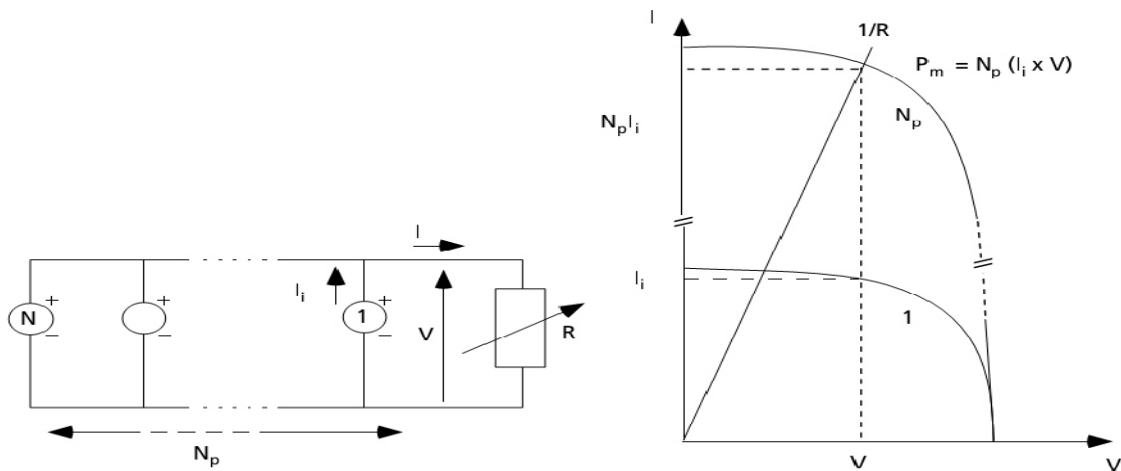


Figure I.18 : Cellules identiques en parallèle (np). [20]

Association hybride (en série et en parallèle) :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc} \tag{I.02}$$

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \tag{I.03}$$

$$P = n_p \times n_s \times V_{oc} \times I_{cc} \tag{I.04}$$

La figure montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques :

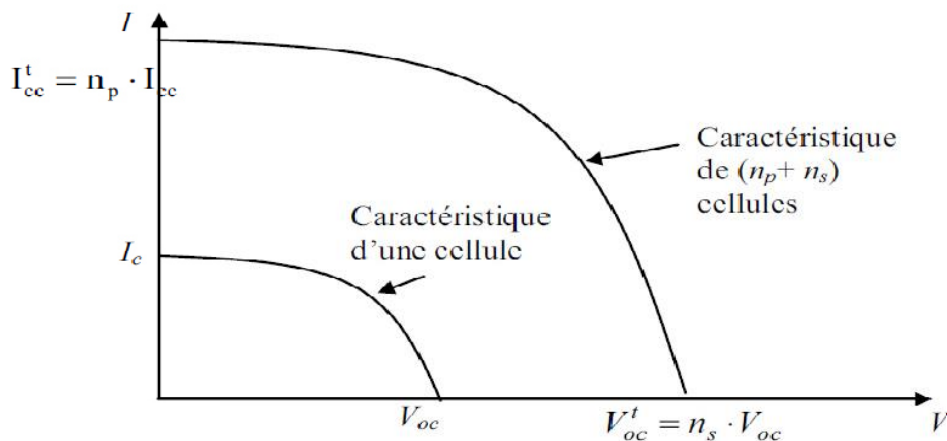


Figure I.19 : Cellules identiques résultantes de série-parallèle groupement.[20]

Avec : (n_p) nombre des cellules en parallèle, (n_s) nombre des cellules en série.

I.5. Le Module Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque (PV) isolée est généralement peu utile car sa faible épaisseur la rend fragile et sa faible tension et son faible courant la rendent inutilisable pour alimenter directement des équipements électriques courants normalisés tels que 12, 24, 48V, etc. Pour augmenter la puissance et l'énergie produite par les cellules PV, les fabricants les assemblent en série et en parallèle pour former un module PV (Figure I.20).

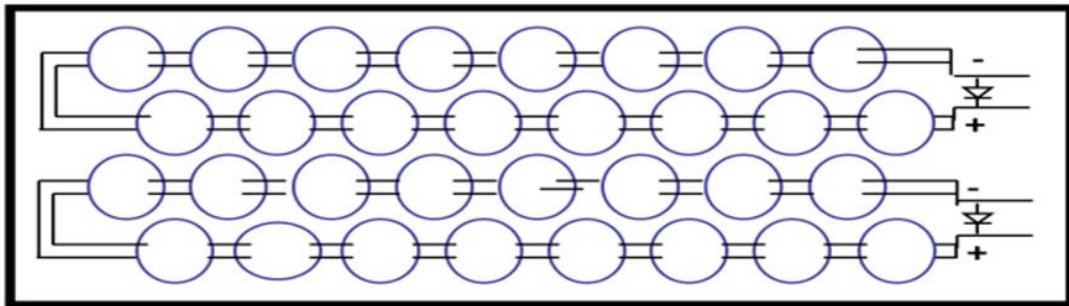


Figure I.20 : Module PV de N_p branches parallèles et N_s cellule en séries.

En connectant plusieurs cellules en série, la tension désirée peut être atteinte (N_s), et pour obtenir la puissance désirée, plusieurs de ces séries peuvent être montées en parallèle (N_p). Ces modules sont protégés pour leur conférer une résistance mécanique et une protection efficace contre les agressions extérieures. La puissance P_{GPV} fournie à la sortie du générateur PV dépend du nombre de cellules PV connectées en série pour constituer une branche PV (N_s) et du nombre de branches PV connectées en parallèle (N_p). Pour obtenir un courant important du champ PV, il est possible d'utiliser des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, ou de connecter plusieurs modules PV de paramètres identiques pour assurer un fonctionnement optimal du générateur PV.

La puissance optimale du générateur PV est atteinte lorsque chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale (P_{max}). Cette valeur est obtenue à partir des valeurs optimales de la tension (V_{mpp}) et du courant (I_{mpp}) sur la courbe $P(V)$ du champ PV. Afin de réduire les dysfonctionnements, les fabricants ne commercialisent pas de cellules PV isolées. Ainsi, les générateurs PV sont souvent vendus sous forme de modules précâblés, constitués de plusieurs cellules. [21]

I.6. Le Générateur Photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est formé d'un ensemble de cellules photovoltaïques qui travaillent ensemble pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Les cellules photovoltaïques sont connectées entre elles en série ou en parallèle pour former un module photovoltaïque. Toutes les cellules d'un même module doivent être identiques, et sont soudées ensemble à l'aide de collecteurs métalliques. Les modules peuvent être combinés en panneaux photovoltaïques pour former un système complet. Le système photovoltaïque fonctionne en

captant l'énergie solaire, qui est convertie en électricité et distribuée à un récepteur, la production d'électricité étant directement proportionnelle à la puissance d'ensoleillement.

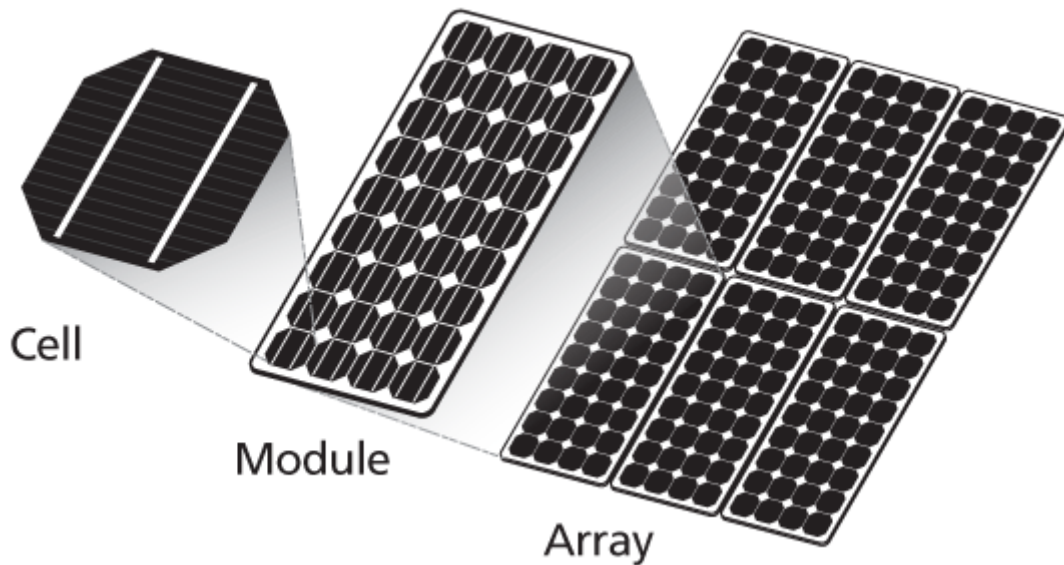


Figure I.21 : Un générateur Photovoltaïque. [22]

I.7. Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque :

I.7.1. Tension en circuit ouvert :

Il fait référence à la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque les pôles (+) et (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans cette situation, l'alimentation de la cellule est complètement nulle. [23]

I.7.2. Courant de court-circuit :

C'est le courant produit par un court-circuit des bornes de la cellule (obtenu pour $V=0$). Elle croît linéairement avec l'intensité d'éclairage des cellules et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charge à l'intérieur de la cellule et de la température. [24]

I.7.3. Puissance-tension :

La puissance électrique produite par une cellule photovoltaïque est un produit de la tension et du courant qu'elle génère. Le courant et la tension dépendent des caractéristiques électriques de la cellule ainsi que de la charge électrique sur ses bornes. Les caractéristiques électriques de la cellule sont résumées dans un graphique appelé graphique de courant-tension caractéristique. Chaque dipôle électrique est distinctif par caractéristique de courant-tension qui le définit totalement.

La puissance fournie par la cellule est donnée par le produit de la tension et le courant et sa expression est donné par l'équation suivante :

$$P = I \times V \quad (I.05)$$

En se basant sur la relation courant-tension, il est pertinent de représenter graphiquement la puissance en fonction de la tension V , qu'on s'appelle la caractéristique puissance-tension. [23],[25]

I.7.4. Courant-tension :

Chaque cellule photovoltaïque se distingue par une courbe courant-tension (I-V) qui représente l'ensemble des configurations électriques que la cellule peut prendre. Cette courbe est définie par trois grandeurs physiques, sous un éclairement donné.

- Son courant de court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représente le courant généré par une cellule allumée connectée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximum power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{MPP} , I_{MPP} (parfois aussi appelé V_{mpp} , I_{mpp}).
- Sa tension en circuit ouvert : V_{co} . Cette valeur représente la tension générée par une cellule allumée non connectée. [26],[27]

I.7.5. Facteur de forme :

Il s'agit du facteur de remplissage (FF). Ce coefficient représente la relation entre la puissance maximale que la cellule désignée est capable de fournir P_{max} et la puissance représentée par le produit $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur est grande, plus la puissance sera disponible pour l'utiliser. En conséquence, des compromis technologiques ont été faits pour améliorer la capacité des cellules à atteindre les caractéristiques idéales.[23]

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.06)$$

I.7.6. Le rendement :

Le rendement de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.[20]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{S \times G_0} \quad (I.07)$$

I.8. Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque :

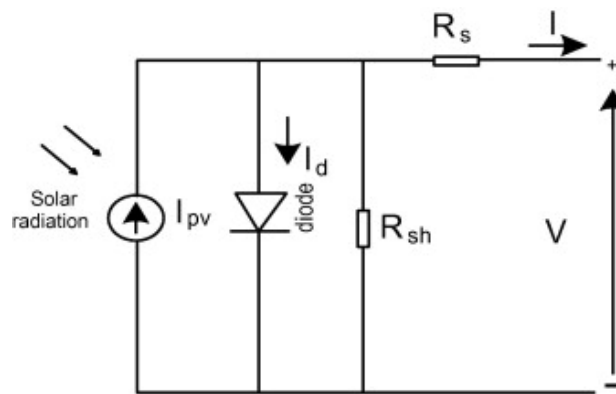


Figure I.22 : Modèle d'une cellule réelle. [28]

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.08)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule.

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance parallèle R_{sh} .

Photo courant créé par la cellule :

$$I_{ph} = (I_{sc} + (K_i \times (T - 298))) \frac{G}{G_0} \quad (I.09)$$

K_i : Coefficient de la température d' I_{pv} .

I_{cc} : Courant de court-circuit.

G_0 : Eclairement pour les STC.

G : Éclairement.

T : est la température effective des cellules en Kelvin (K).

Courant de la résistance parallèle :

$$I_{sh} = \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (I.10)$$

V : tension de sortie

R_{sh} : Résistance Parallèle

I : courant sortie de cellule

R_s : Resistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

Courant de diode :

$$I_d = I_s \times \left(\exp \left(q \times \frac{(V + IR_s)}{KTn} \right) - 1 \right) \quad (I.10)$$

q : Charge électrique élémentaire (1,6 10⁻¹⁹ C).

K : la constante de Boltzmann (1,3854 10⁻²³J/K).

n : est le facteur d'idéalité de la jonction (diode).

Is : courant de saturation.

Courant de saturation :

$$I_s = I_{rs} \times \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \times \exp \left[\frac{\left(q \times E_{g0} \times \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right)}{nK} \right] \quad (I.11)$$

Irs : courant inverse de saturation.

Tr : Température référence de la cellule.

Eg0 : Énergie de seuil.

Courant reverse de saturation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{q \times V_{oc}}{nKT} \right) - 1} \quad (I.12)$$

Vco : Tension de circuit ouvert.

En remplaçant dans (1.) les équations (1.2), (1.) et (1.), nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_s \times \left(\exp \left(q \times \frac{(V + IR_s)}{KTn} \right) - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (I.13)$$

I.9. Identification des paramètres dans les conditions standards STC :

STC signifie « Standard Test Conditions » ou « Conditions Standard de Test » en français. Il s'agit d'un ensemble de conditions standardisées utilisées pour mesurer la performance des cellules photovoltaïques.

Les conditions STC incluent une température de cellule de 25°C, une intensité de lumière d'1000 W/m² avec un spectre d'irradiation standard AM1.5 et un angle d'incidence de la lumière de 90°. Ce standard permet de mesurer la puissance nominale d'une cellule photovoltaïque en laboratoire et de comparer les performances de différents types de cellules photovoltaïques.

Il est important de noter que les conditions réelles d'utilisation des cellules photovoltaïques peuvent être différentes des conditions STC et donc influencer la performance effective de ces cellules.[29]

I.10. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Nombreux constructeurs offrent une gamme importante des modules solaires, on prend l'exemple d'un panneau BP SX 150S avec une puissance de 150 W.

Les paramètres du module BP SX 150S :

- Nombre des cellules dans le module $N_{cell} = 72$ cellules.
- La puissance maximale $P_m = 150$ (W).
- La tension de circuit ouvert $V_{co} = 43.5$ (V).
- Le courant de court-circuit $I_{cc} = 4.75$ (A).
- La tension au point de la puissance maximale $V_{mp} = 34.5$ (V).
- Le courant au point de la puissance maximale $I_{mp} = 4.35$ (A)
- Le coefficient de la température de $V_{co} = -(160 \pm 20)$ (mV/deg.C).
- Le coefficient de la température de $I_{cc} = -(0.5 \pm 0.05)$ (%/deg.C).

Les figures montrent les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(v)$ obtenue pour un seul module tracé pour un éclairement $E=1000$ W/ m² et une température ambiante $T = 25^\circ\text{C}$ (STC).

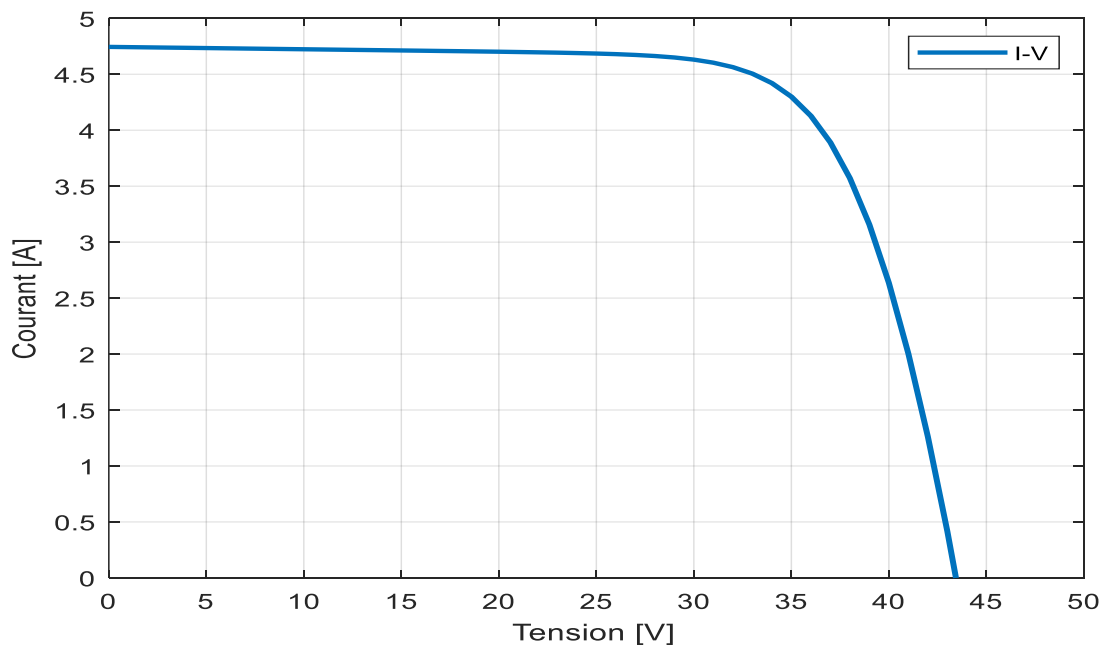


Figure I.23 : Caractéristique Courant-Tension.

D'après le graphe précédent, on observe que lorsque la tension V augmente le courant I du générateur fait une décroissance légère jusqu'à ce que la tension atteigne la valeur maximale le courant se décroît rapidement.

L'évolution du courant commence du courant de court-circuit I_{cc} qui correspond à une tension nulle $V=0V$ jusqu'au circuit ouvert V_{co} , dont le courant est nul $I=0A$ et la tension atteint sa valeur maximale I_{cc} .

- La tension de circuit ouvert (V_{co})= 43.5 V
- Le courant de court-circuit (I_{cc})= 4.75 A

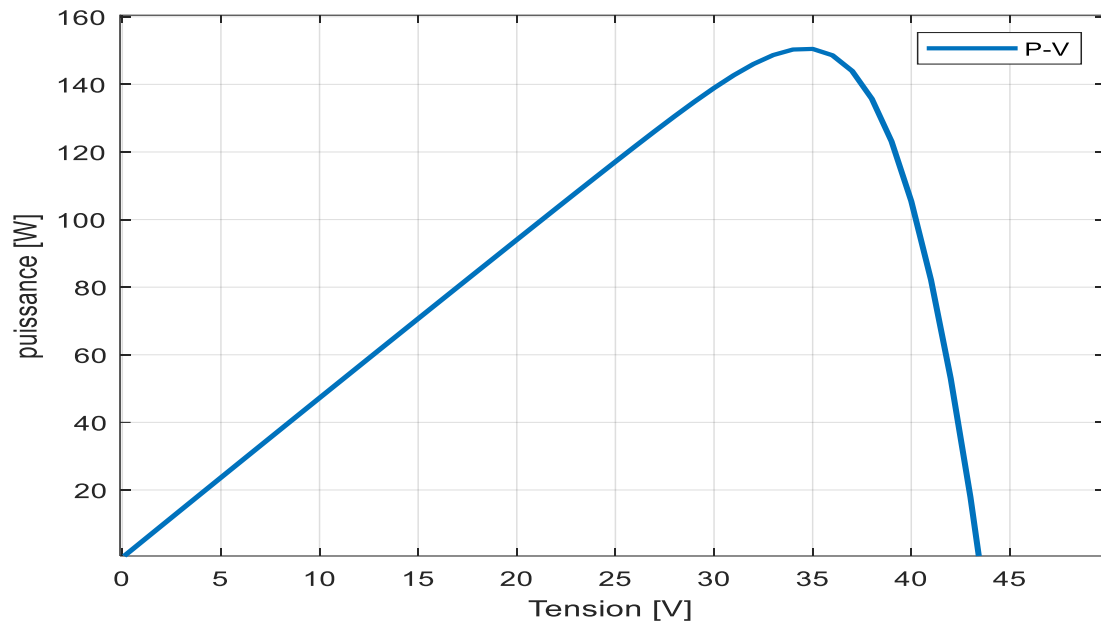


Figure I.24 : Caractéristique Puissance-Tension.

D'après les résultats de la simulation d'une caractéristique $P(V)$, on observe que lorsque la tension augmente, la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale P_{mpp} à une tension V_{mpp} , ensuite elle décroît lorsque la tension atteint sa valeur maximale (tension de circuit-ouvert V_{co}).

- La puissance max (P_{mpp})= 150W.
- La tension max (V_{mpp})= 34.5V.
- Le courant max (I_{mpp})= 4.35A.

I.11. Influence De La Température Et L'éclairement :

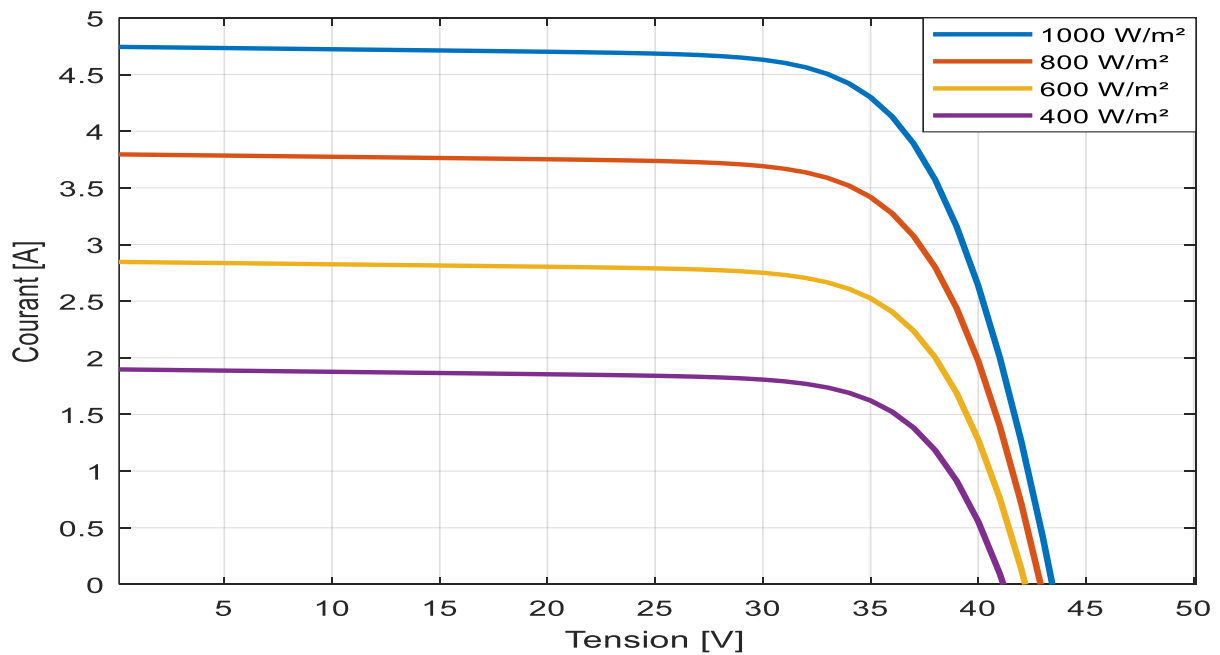


Figure I.25 : Caractéristique I-V avec variation d'éclairement.

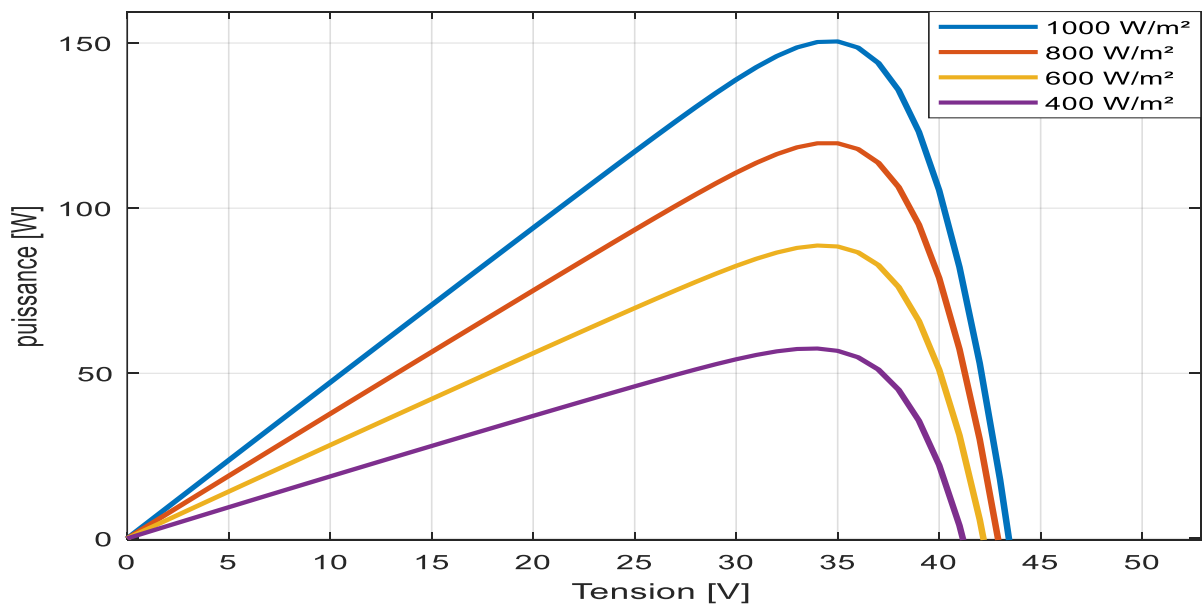


Figure I.26 : Caractéristique P-V avec variation d'éclairement.

La figure I.25 illustre comment l'éclairement affecte les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque. La température est maintenue constante à 25°C, tandis que l'éclairement varie entre 400 W/m² et 1000 W/m². Les résultats montrent que le courant subit une variation importante tandis que la tension varie légèrement. Cela signifie que le courant est inversement proportionnel à l'éclairement, tandis que la tension est une fonction logarithmique de l'éclairement. En conséquence, la tension à circuit ouvert reste pratiquement identique même à faible éclairement. [26]

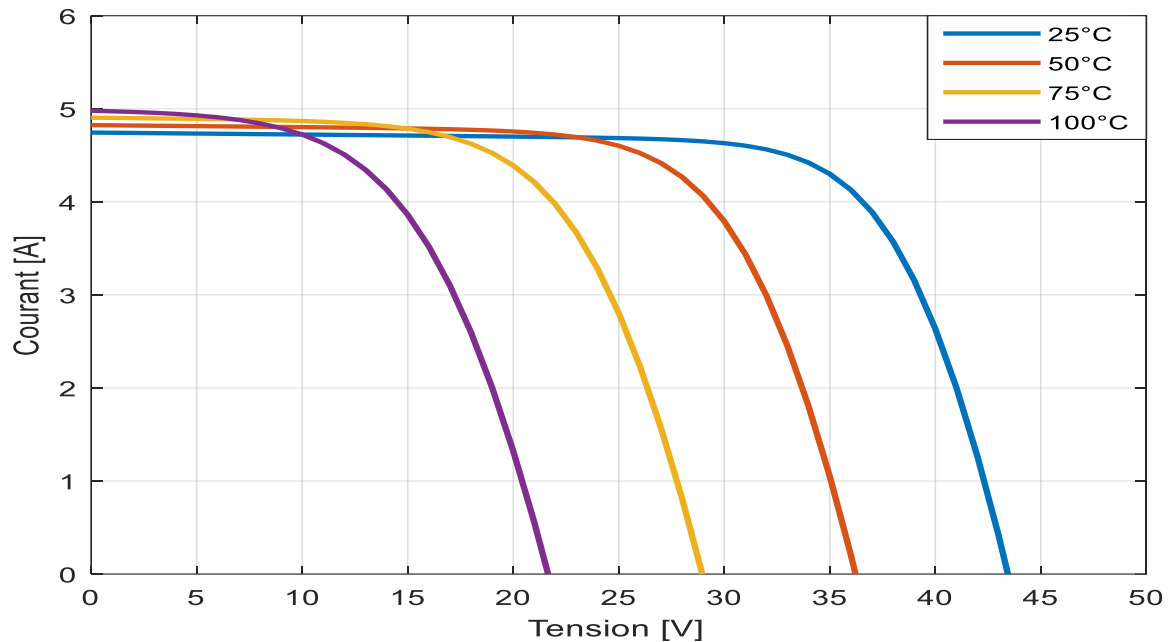


Figure I.27 : Caractéristique I-V avec variation de température.

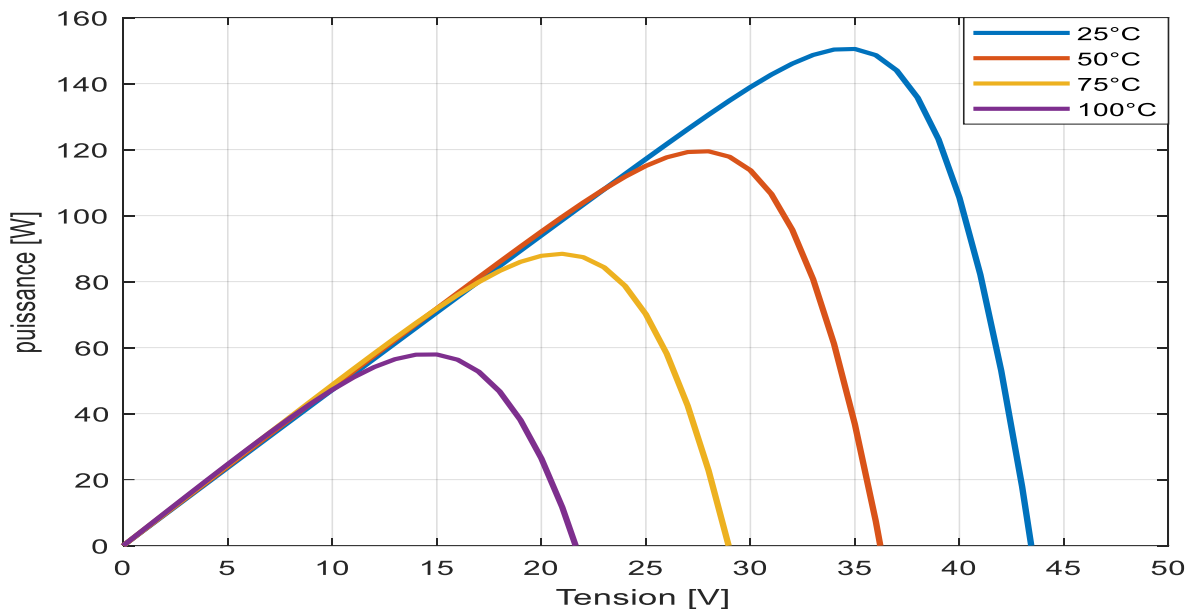


Figure I.28 : Caractéristique P-V avec variation de température.

Les graphiques suivants montrent les caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur photovoltaïque pour une irradiation constante de 1000 W/m² et une température variant de 25°C à 100°C. En augmentant la température de 25°C à 100°C à une irradiation de 1000 W/m², on constate que la tension de circuit ouvert diminue lourdement tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement. En outre, la puissance maximale diminue, ce qui entraîne une diminution du rendement du générateur PV. En d'autres termes, la température a une influence négative sur la tension de circuit ouvert. Il est donc essentiel de prendre en compte les variations de température lors de la conception d'une installation afin d'optimiser sa performance et son rendement. [26]

I.12.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'énergie solaire, le potentiel mondial et en Algérie, les types de rayonnement solaire.

Puis nous avons étudié le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses types et paramètres et sa modélisation ainsi que l'association des cellules.

On a fini par étudier l'influence de l'éclairement et de la température sur la puissance produite par le module photovoltaïque.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leur commande MPPT pour trouver la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Chapitre II :

Les convertisseurs DC-DC(Hacheur)

Et la commande Maximum power

Point tracker (MPPT)

II.1. Introduction :

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque dépendent du rayonnement solaire et de la température effective. Lorsque ces effets naturels changent, ils affectent le système photovoltaïque, provoquant une fluctuation du point de puissance maximale. Du fait de cette fluctuation, on insère souvent entre le générateur photovoltaïque et la charge un convertisseur statique DC-DC, et cette adaptation peut être contrôlée par la commande MPPT.

Les convertisseurs DC-DC sont essentiels dans les alimentations de puissance et peuvent être trouvés dans de nombreuses applications à différents niveaux de puissance. Il existe plusieurs topologies de circuits pour les convertisseurs DC-DC, classées en topologies simples (de second ordre) et complexes (d'ordre plus élevé). Les topologies simples comprennent les convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost.

MPPT signifie Maximum Power Point Tracking. Le but de régulateur MPPT est de trouver le point de sortie maximum du courant ou tension fourni par le panneau. Puis de faire en sorte de toujours utiliser cette pleine puissance. Dans les années précédentes, de nombreux algorithmes étaient utilisés pour suivre le MPP, nous les mentionnons perturbation et observation (P&O), et incrémental conductance.

II.2. Convertisseur DC-DC (Hacheur) :

Les hacheurs sont des dispositifs qui convertissent le courant continu en un autre courant continu avec une grande flexibilité et efficacité, ce qui permet de réguler la puissance électrique dans des circuits à courant continu.

Conversion de puissance afin d'éviter la perte de puissance et la surchauffe des composants électroniques. Pour cette raison, il est important d'effectuer la conversion de puissance autour des composants de stockage d'énergie tels que les inductances et les condensateurs, ainsi que les commutateurs de puissance appropriés. Les MOSFETs sont généralement utilisés pour les niveaux de puissance relativement bas, tandis que les IGBTs sont utilisés pour les niveaux de puissance plus élevés. Les thyristors sont couramment utilisés pour les niveaux de puissance les plus élevés. Une illustration d'un convertisseur DC/DC est présentée dans la figure (II.1) qui peut être utilisée comme une interface entre la source et la charge.

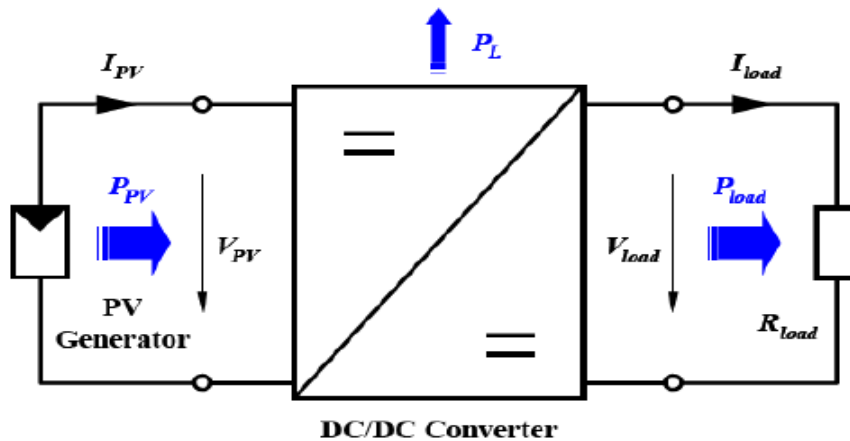


Figure II.1 : Symbole d'un convertisseur DC-DC. [30]

II.3. Connexion Direct Générateur Photovoltaïque-Charge :

Il existe encore de nombreuses applications qui connectent directement un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge, sans électronique intermédiaire. Cette méthode est simple, peu coûteuse et fiable, mais elle ne permet pas un transfert d'énergie optimal du GPV à la charge. De plus, cette méthode ne convient pas pour une charge à courant alternatif car le GPV fournit un courant continu. Pour connecter un GPV à une charge alternative, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur de type onduleur. La figure (II.2) illustre cette configuration, où une diode anti-retour est placée entre le GPV et la charge pour la protéger. En effet, si la charge était une batterie et que le module n'était pas éclairé, la batterie pourrait se décharger dans le GPV, endommageant ainsi les deux composants. [31].

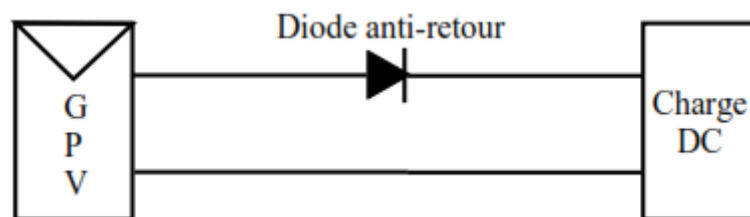


Figure II.2 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

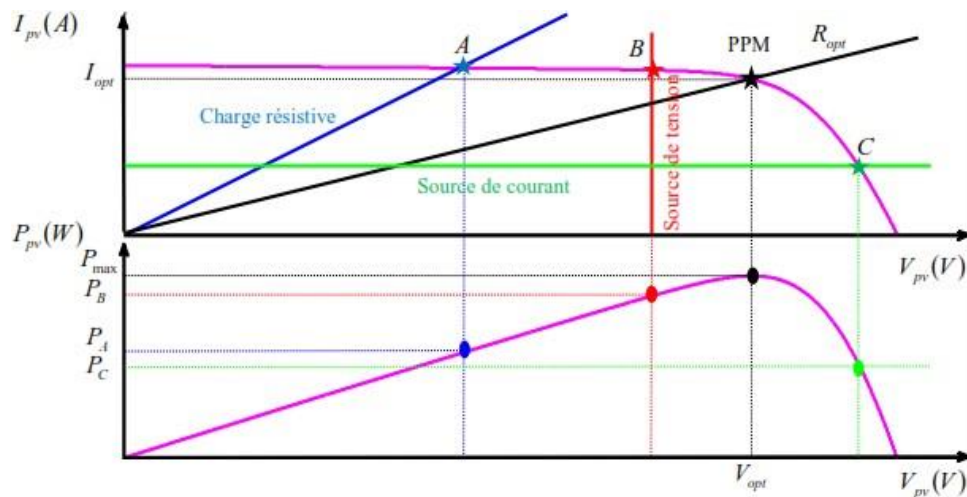


Figure II.3 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC [32].

Une charge connectée au GPV peut être de type résistif, source de tension ou source de courant. La figure (II.3) montre les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charge. Les points de fonctionnement A, B et C représentent les intersections entre la caractéristique I-V du GPV et les caractéristiques des trois types de charge. Le fonctionnement optimal est obtenu avec le Point de Puissance Maximum (PPM), qui correspond à la tension optimale (V_{MPP}) et au courant optimal (I_{MPP}). Pour les points A, B et C, les puissances fournies par le générateur sont respectivement P_A , P_B et P_C . Cependant, toutes ces puissances sont inférieures à la puissance maximale disponible P_{max} , ce qui nécessite l'ajout d'un étage d'adaptation pour remédier à ce problème

II.4. Types Des Convertisseurs DC-DC :

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC : Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$. Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, Le FLYBACK. SEPIC, ĆUK, ...

II.4.1. Convertisseur Buck :

Lors de l'étude du convertisseur Buck, la figure (II.4) présente la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur. Ce dernier se caractérise par la disposition en série de l'interrupteur avec la source. [33]

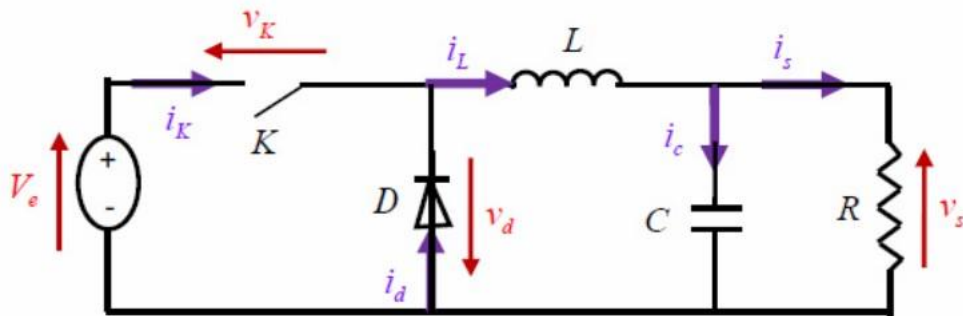


Figure II.4 : Schéma de base d'un convertisseur buck.

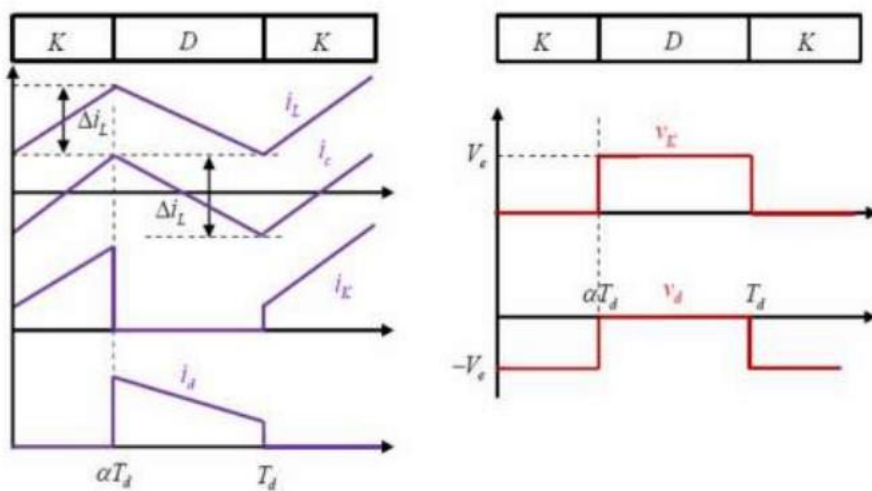


Figure II.5 : Formes d'ondes des courants et tension du convertisseur buck.

L'ondulation de la tension de sortie peut être définie de différentes manières selon le contexte :

$$V_s = \alpha \times V_e \tag{II.01}$$

$$\Delta V_s = \frac{(1-\alpha)e}{L.f} \tag{II.02}$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8C.f} = \frac{(1-\alpha)e8C}{L.f^2} \tag{II.03}$$

Le convertisseur est donc abaisseur de tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge : $I_L = I_s$ (II.04) [34]

$$V_{k,x} = |V_{k,max}| = V_e \tag{II.05}$$

$$\text{En courant: } I_{k,max} = I_{d,max} = I_{L,max} = L \frac{\Delta i_L}{2} \tag{II.06}$$

II.4.2. Convertisseur Boost :

Le convertisseur DC-DC de type Boost est composé principalement d'un interrupteur K (comme un IGBT ou MOSFET) et d'une diode D. Pour contrôler l'interrupteur K, un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI) est utilisé, avec une période de découpage fixe Td et un rapport cyclique variable α . Les deux interrupteurs sont complémentaires [35] :

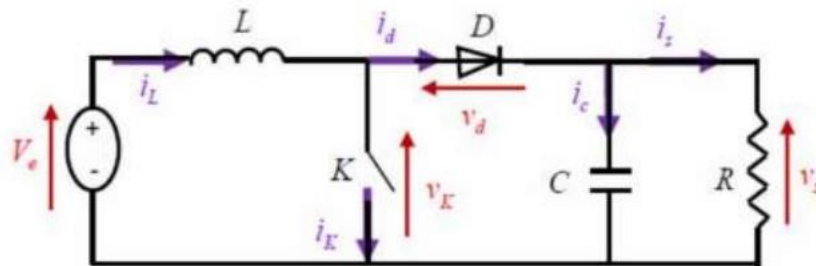


Figure II.6 : Schéma de base d'un convertisseur boost. [32]

Lorsque K est fermé, D est ouvert et vice versa. Pendant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αTd et ouvert de αTd à Td .

Il y a deux modes de fonctionnement : avec conduction discontinue lorsque le courant dans l'inductance s'annule, et avec conduction continue lorsque le courant ne s'annule pas. Le second cas est le plus important et est étudié ici. La figure (II.7) représente le schéma de principe du convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

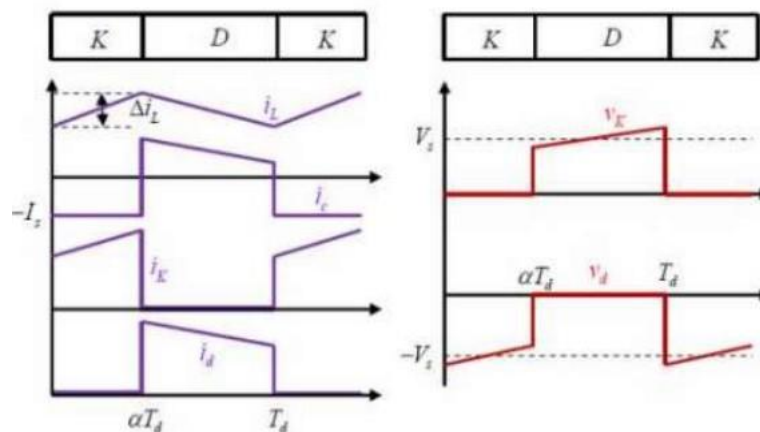


Figure II.7 : Formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseur boost.

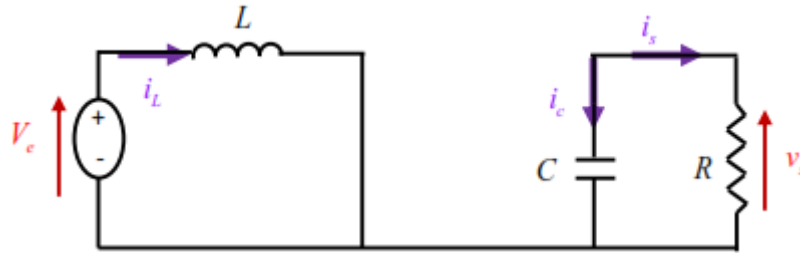


Figure II.8 : Circuit équivalent de boost quand K est fermée.

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha Td$), le circuit du convertisseur est Figure (II.8) :

$$L \frac{di_L}{dt} = Ve \quad (\text{II.07})$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{Ve}{L} t \quad (\text{II.08})$$

Avec I_{\min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha Td$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{\max}

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{Ve}{L} \alpha Td \quad (\text{II.09})$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert $\alpha Td < t < Td$ le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (II.9) :



Figure II.9 : circuit équivalent de boost quand K est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = Ve + Vs \quad (\text{II.10})$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{Ve - Vs}{L} (t - \alpha Td) \quad (\text{II.11})$$

A l'instant $t = Td$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{\min} comme suit :

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{Ve - Vs}{L} (1 - \alpha) Td \quad (\text{II.12})$$

Avec $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$: représente l'ondulation du courant dans l'inductance. Ceci dit, l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.09) et (II.12) donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_s [32] :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} Ve \quad (\text{II.13})$$

D'après l'équation (II.13) on peut contrôler la valeur moyenne de la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension. En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_S \quad (\text{II.14})$$

On exprime l'ondulation du courant dans l'inductance d'après l'équation (II.09)

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad \text{Avec } f \text{ la fréquence de découpage.}$$

Pendant l'intervalle $[0, \alpha T_d]$ seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, ce qui donne l'équation [33] :

$$C \frac{dV_S}{dt} = -i_S \quad (\text{II.15})$$

$$\Delta V_S = \alpha \frac{I_S}{C f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha) R.C.f} \quad (\text{II.16})$$

II.4.3. Convertisseur Buck-Boost :

Le Buck-Boost est un type de convertisseur à découpage qui transforme une tension continue en une autre tension continue de polarité inverse, mais de valeur plus grande ou plus petite [32].

Le fonctionnement de ce convertisseur est illustré dans la figure (II.10), tandis que la figure (II.11) montre les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode, ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et des tensions (à droite).

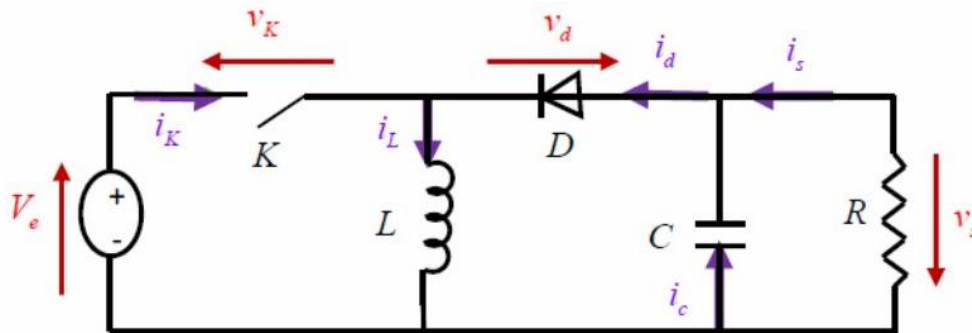


Figure II.10 : Schéma de base d'un convertisseur buck boost.

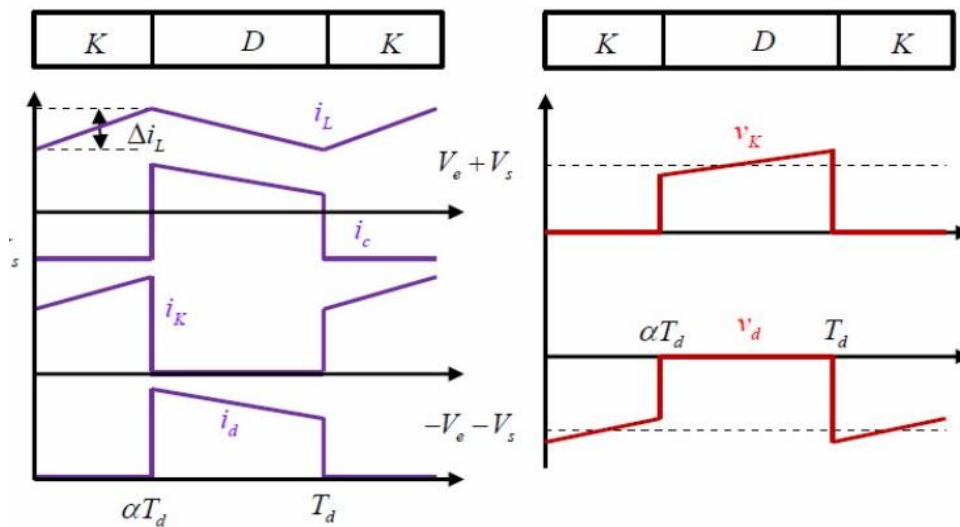


Figure II.11 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur buck – boost.

Si l'intervalle de temps $[0 \alpha T_d]$ est tel que K soit fermé et D ouvert, le circuit électrique du convertisseur ressemblera à celui illustré dans la figure (II.12) :

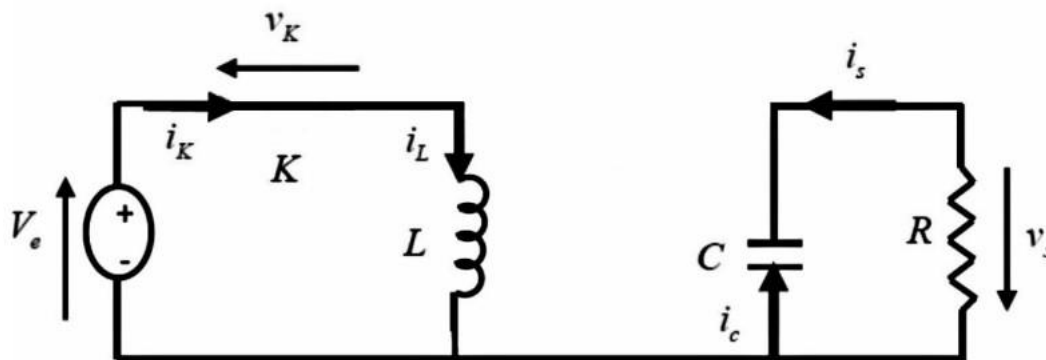


Figure II.12 : circuit équivalent du buck- boost quand l'interrupteur est fermé.

Les équations qui contrôlent le système sont les suivantes :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \tag{II.17}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \tag{II.18}$$

Au moment où $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max} : D'où

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \tag{II.19}$$

Si l'intervalle de temps $[\alpha T_d, T_d]$ est tel que K soit ouvert et D fermé, le circuit électrique deviendra comme illustré dans la figure (II.13) :

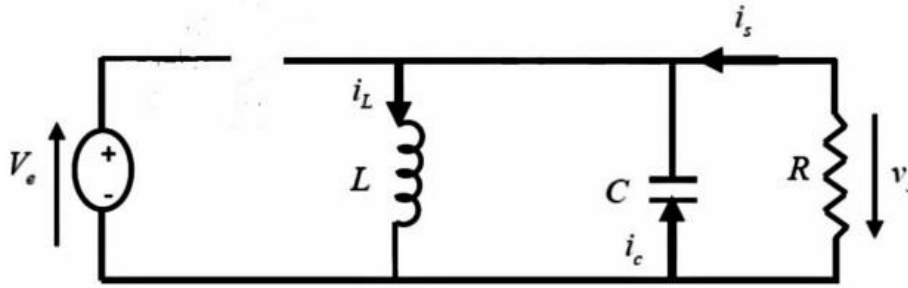


Figure II.13 : Circuit équivalent du buck – boost quand l'interrupteur est ouvert.

Mentionnons maintenant les nouvelles équations :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_s \quad (\text{II.20})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II.21})$$

Au moment où $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min} , comme indiqué ci-dessous :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.22})$$

La fluctuation du courant dans l'inductance est exprimée de la manière suivante :

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min} \quad (\text{II.23})$$

Lorsqu'on égale les deux équations de la fluctuation du courant (I.18) et (I.21), on obtient la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.24})$$

En utilisant le principe de conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut déterminer la valeur moyenne du courant dans l'inductance comme suit :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{II.25})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est en opposition de phase avec la tension d'entrée et peut être soit plus grande soit plus petite que cette dernière en fonction du rapport cyclique. Le Buck-Boost est donc un convertisseur élévateur-abaisseur-inverseur de tension [36].

On résume les types des hacheurs dans ce tableau :

Hacheur	Le fonctionnement	Les équations
Hacheur survolteur (boost)	$V_e < V_s$	$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha}$
Hacheur dévolteur (buck)	$V_e > V_s$	$V_s = \alpha \cdot V_e$
Hacheur survolteur – dévolteur (buck – boost)	$V_e < V_s$ ou $V_e > V_s$ Selon la position de l'interrupteur (ouvert ou fermé), la tension de sortie moyenne V_s peut être plus élevée ou plus basse que la tension d'entrée.	$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha}$

Tableau II.1 : Récapitulatif du fonctionnement des hacheurs.

II.5. Définition et Principe De La Commande MPPT :

La commande MPPT est un élément crucial des systèmes photovoltaïques, car elle permet de trouver le point de fonctionnement optimal du générateur PV en fonction des conditions météorologiques et de la charge. Cette régulation repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique α pour maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV. [37]

Dans cette optique, une commande numérique est étudiée pour transférer automatiquement la puissance optimale délivrée par le panneau solaire à la charge, indépendamment de l'intensité d'éclairement et de la valeur de la charge. Par exemple, pour une puissance incidente W_1 , la puissance optimale transférée à la charge ne peut être maximale qu'à un rapport cyclique α_{1opt} donné (point PPM1 sur la Figure II.14) [38]. Si la puissance incidente change à W_2 , le point de puissance maximale devient PPM2, et le point de fonctionnement du GPV est le point Pf (Figure II.14-A) Pour converger vers le nouveau point PPM2, le rapport cyclique α doit être ajusté à la valeur α_{2opt} . Il est sera de même lorsque la charge R_s change (Figure II.14-B) : le point de puissance maximale se déplace de sa position optimale (PPM1), pour converger vers PPM1, il est nécessaire d'ajuster le rapport cyclique α . Dans un système PV autonome, cette régulation doit être effectuée automatiquement pour maintenir le point de fonctionnement optimal. En pratique, la commande MPPT réalise cette régulation. Figure (II.15)

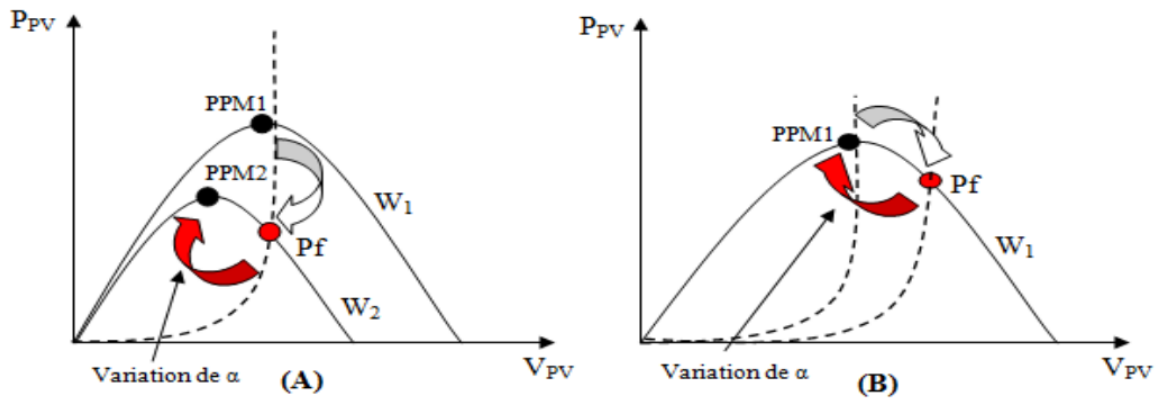


Figure II.14 : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge R_S (B). [32]

Depuis la publication en 1968 de la première loi de commande de type MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable telle que le PV, diverses publications sur les commandes de type MPPT ont régulièrement été publiées dans la littérature [39]. En raison du grand nombre de publications dans ce domaine, seul le principe de base des premiers types de commandes sont présentés, suivi d'une description de la commande MPPT implémentée à l'aide de circuits électroniques numériques. La commande MPPT réalise cette régulation automatiquement dans un système PV indépendant et autonome. [40]

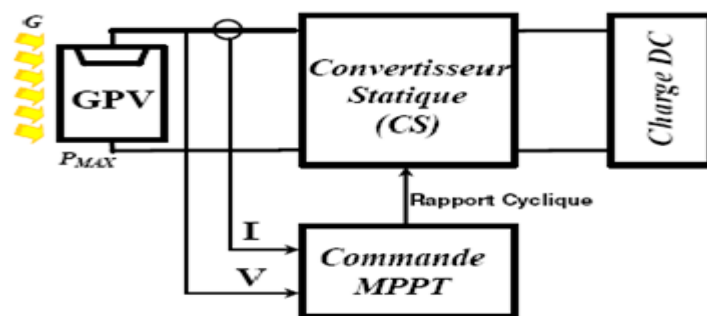


Figure II.15 : Schéma de principe du convertisseur MPPT. [30]

II.6. Classification de La Commande MPPT :

Manière plus spécifique. On peut distinguer les commandes MPPT en fonction de la méthode de recherche utilisée ainsi que des paramètres d'entrée. Bien que les commandes MPPT puissent être classées de manière générale en fonction de leur type d'implémentation électronique (analogique, numérique ou mixte), une classification plus précise basée sur leur méthode de recherche et leurs paramètres d'entrée est plus intéressante.

II.6.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du Convertisseur :

Il existe plusieurs types de commandes MPPT qui recherchent le point de puissance maximale (PPM) en utilisant la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (GPV) comme référence. Par exemple, la méthode Perturb & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui ajustent la puissance de contrôle en fonction de la variation de la puissance du GPV pour suivre le PPM, ou encore les commandes qui utilisent une relation de proportionnalité entre les paramètres optimaux du PPM (V_{MPP} et I_{MPP}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{co} et I_{cc}). Certains MPPT sont basés sur des réseaux de neurones, qui peuvent stocker tous les cas possibles dans une mémoire informatique importante ou utiliser des approximations. Ces commandes ont l'avantage d'être précises et réactives. [41]

Dans l'ensemble, ces différentes commandes :

II.6.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres sortis du Convertisseur :

Les commandes MPPT basées sur les paramètres de sortie des convertisseurs sont également présentes dans la littérature. L'une de ces commandes consiste à maximiser le courant de sortie du convertisseur, ce qui est souvent utilisé lorsque la charge est une batterie. Dans ces systèmes, une estimation de la puissance maximale est obtenue en utilisant le rendement du convertisseur. Cette estimation est plus précise lorsque le rendement du convertisseur est élevé. Cependant, en général, les systèmes utilisant un seul capteur sont moins précis que ceux utilisant plusieurs capteurs pour mesurer les paramètres d'entrée du système. Ces systèmes ont été initialement conçus pour une utilisation spatiale.

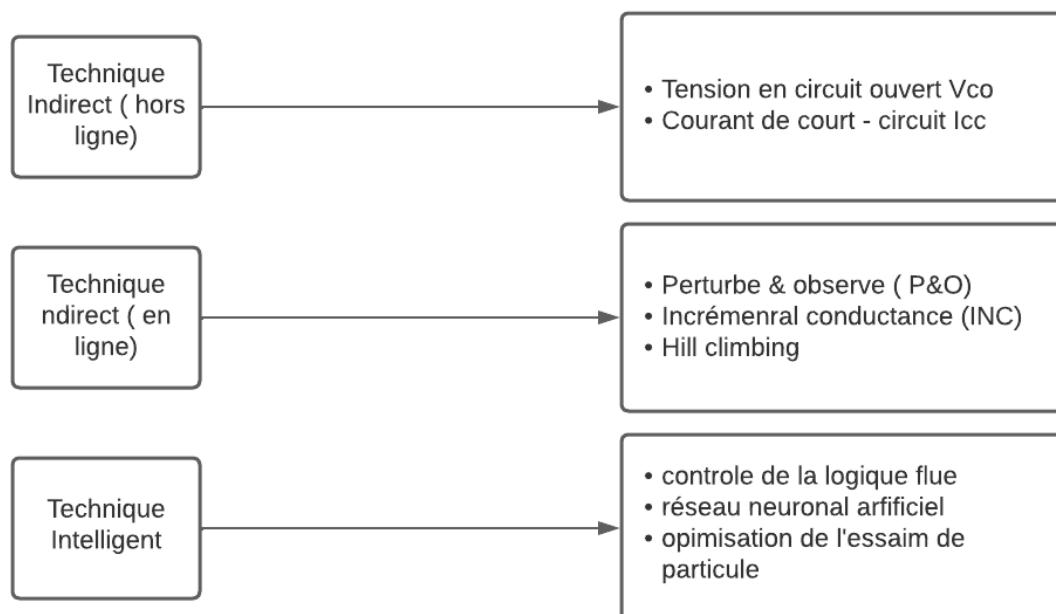


Figure II.16 : Classification de la technique MPPT couramment utilisée. [37]

II.7. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :

II.7.1. MPPT Direct :

Les techniques directes populaires utilisées directement pour le point de puissance maximale sont perturb and observe (P&O), technique de conductance incrément (INC) et Hill Climbing.

Dans les techniques directes, il y aura une mesure en ligne de la tension et de la mesure du panneau périodiquement pour le calcul du cycle de service, le convertisseur pour suivre le point de puissance maximal MPPT [37].

II.7.1.1. Méthode perturbation et observation (P&O) :

La méthode P&O est largement préférée en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Cette méthode consiste à perturber la tension V_{ref} ou le courant I_{ref} , puis à observer comment cela affecte la puissance mesurée ($P=V*I$). Cependant, la variable idéale pour déterminer le point de puissance maximale (MPP) est celle qui varie le moins en réponse aux changements climatiques. Bien que la variation de l'ensoleillement ait plus d'impact sur le courant que sur la tension photovoltaïque, la tension du GPV est plus sensible aux variations de température. Cependant, la température varie lentement et sur une plage limitée, ce qui rend préférable de contrôler la tension du GPV. [42]

L'algorithme consiste à modifier à la fois la tension et le rapport cyclique d'un panneau photovoltaïque (PV) afin de trouver le point de puissance maximale (PPM). La puissance fournie par le PV est mesurée à chaque instant et comparée à la puissance précédente.

Le principe de commande P&O consiste à perturber légèrement la tension V_{pv} , ce qui entraîne une variation de la puissance [43]. La Figure (II.17) permet de déduire que si une augmentation de la tension V_{pv} entraîne une augmentation de la puissance P_{pv} , cela indique que le point de fonctionnement se situe à gauche du MPP. Si, au contraire, la puissance diminue, cela signifie que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être appliqué lorsque la tension diminue. En effectuant diverses analyses sur les effets d'une variation de la tension sur la caractéristique $P(V)$, il est possible de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP et de le faire converger vers le maximum de puissance en utilisant une commande appropriée.

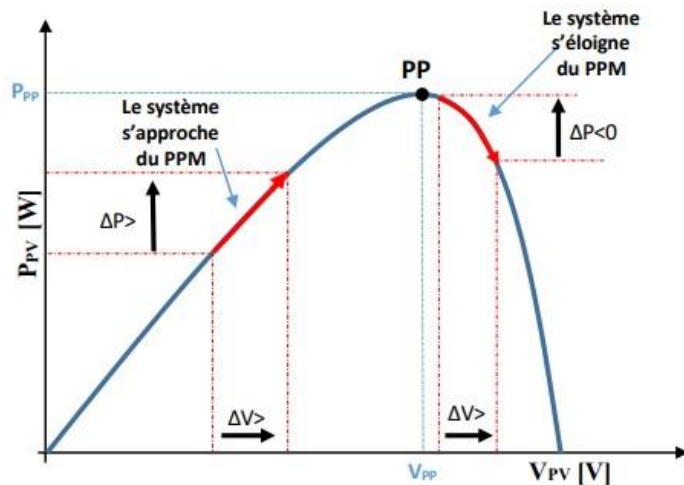


Figure II.17 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).

Si la puissance augmente, le système se rapproche du PPM et le rapport cyclique est ajusté dans le même sens.

Si la puissance diminue, le système s'éloigne du PPM et le rapport cyclique est ajusté dans le sens opposé. Cependant, cette méthode de recherche du PPM peut causer des oscillations autour du PPM en régime établi, ce qui peut être minimisé en réduisant la valeur de l'incrément, mais cela ralentit la recherche du PPM. Un compromis doit donc être trouvé entre précision et rapidité pour optimiser cette commande. [44]

Des oscillations autour du PPM peuvent être maintenues en utilisant deux valeurs fixes d'incrément pour la recherche du PPM, ce qui permet de réduire le temps de recherche lorsque la puissance varie, mais peut prolonger les oscillations autour du PPM.

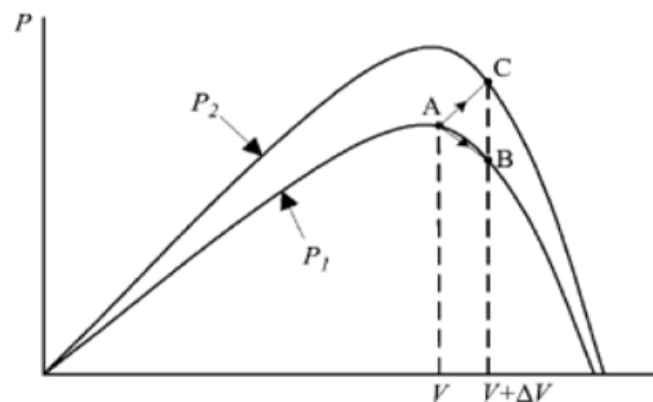


Figure II.18 : Divergence de la méthode P&O. [46]

La Figure (II.19) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [45].

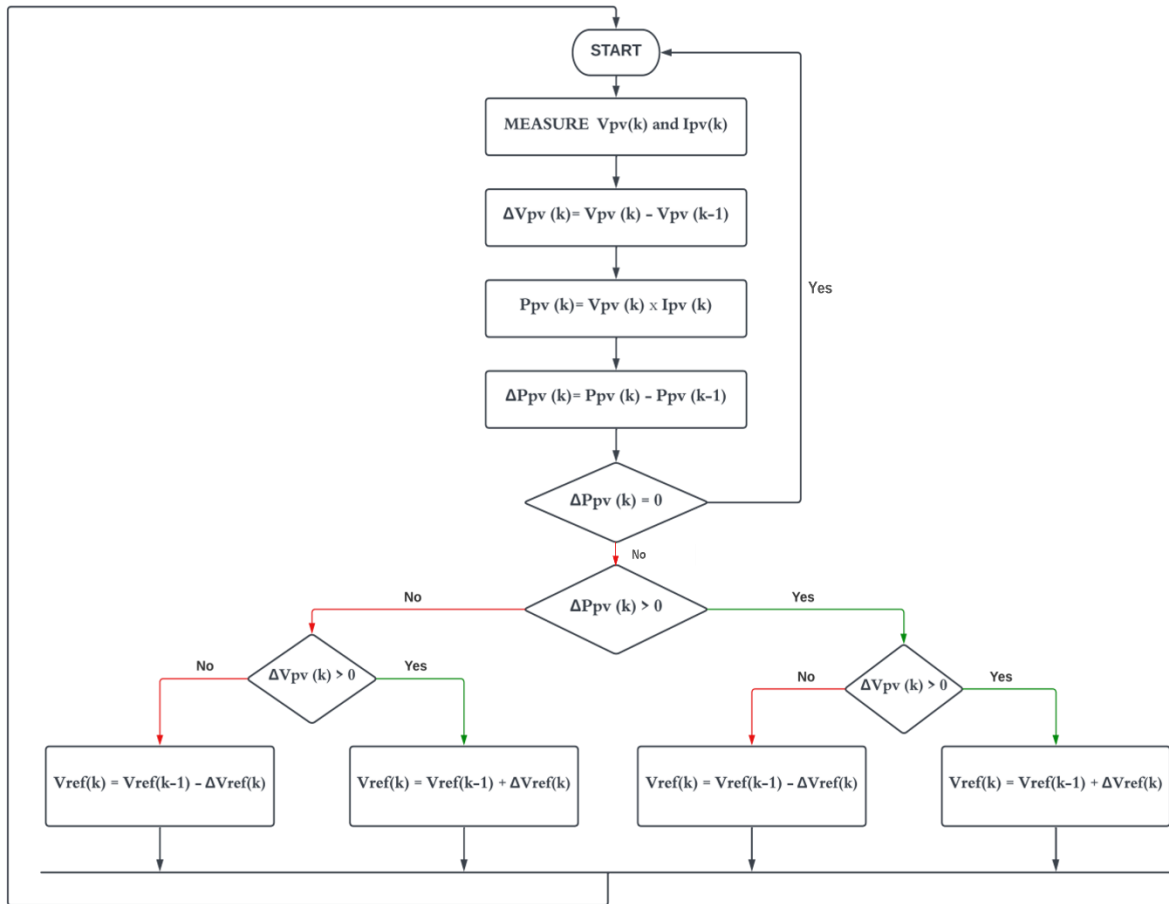


Figure II.19 : l’algorithme de P&O classique.

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

Tableau II.2 : Principe de l’algorithme P&O [32].

II.7.1.2. Méthode d'incrément de la conductance (INC) :

Cette technique est basée sur la connaissance de la valeur de la conductance (G) et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximal (PPM).

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{II.26})$$

Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.27})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

Si $\frac{dP}{dV} > 0$, Le point de fonctionnement est à gauche de PPM.

Si $\frac{dP}{dV} < 0$, Le point de fonctionnement est sur la droite de PPM.

Si $\frac{dP}{dV} = 0$, Le point de fonctionnement est sur le PPM, permet d'écrire les conditions suivantes :

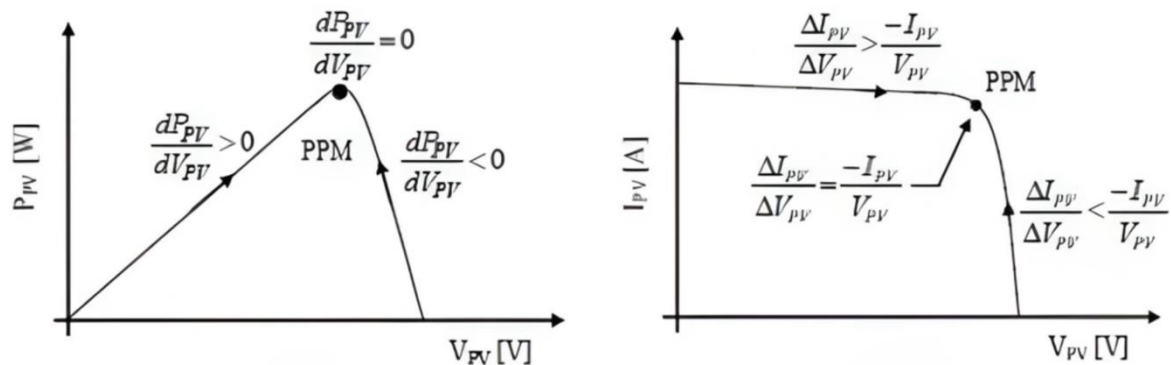


Figure II.20 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G .

La relation entre $G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ et $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ peut-être d'écrit par l'équation suivante : (II.28)

$$\frac{dP}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \cong I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{II.29})$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est sur le PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I}{V}$), avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I}{\Delta V}$), comme l'illustre l'algorithme de la figure (II.20).

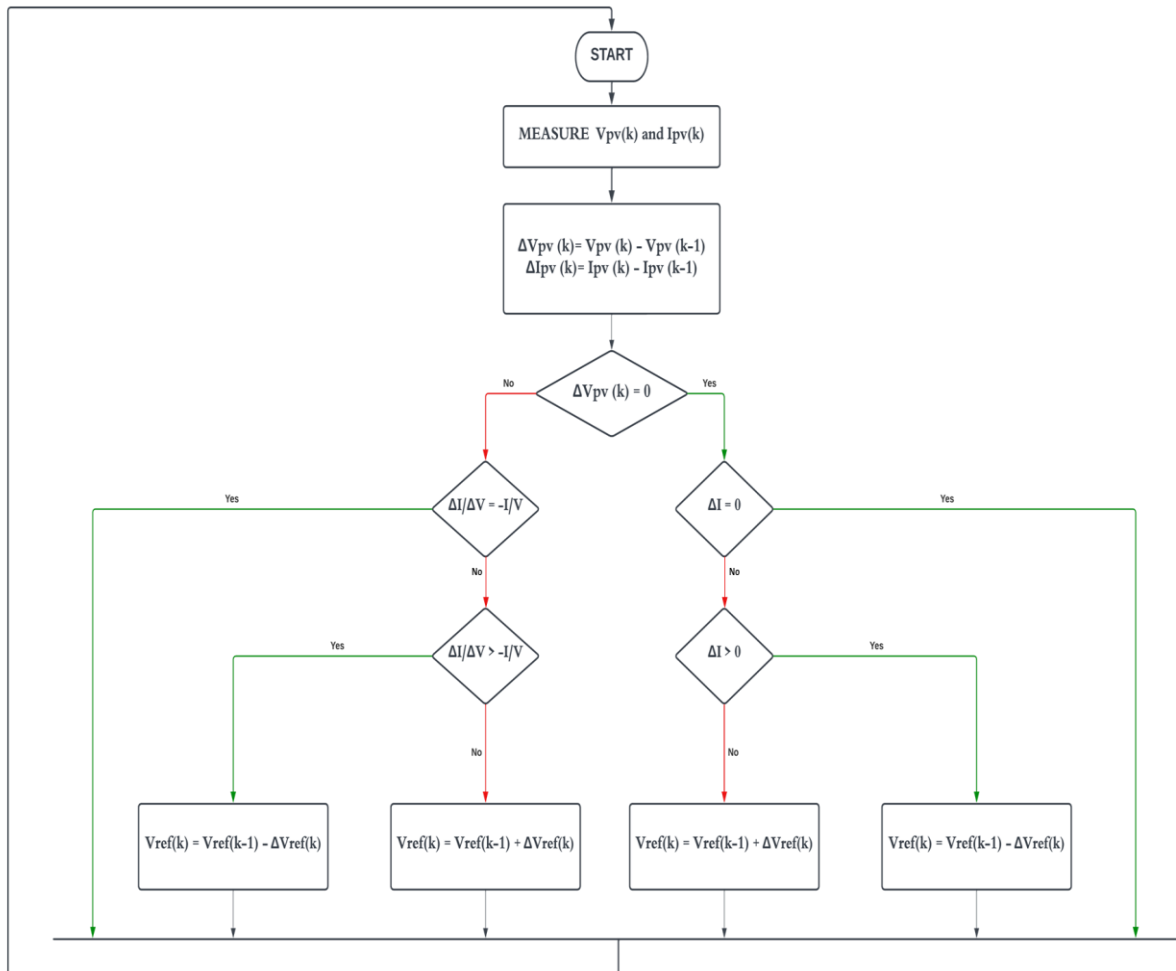


Figure II.21 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance (INC).

Le voltage de référence, représenté par « Vref », est utilisé pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque (GPV) à cette valeur. Si le GPV fonctionne à son point de puissance maximale (PPM), alors la tension optimale sera égale à « Vppm ». Une fois que le PPM est atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu à cette position jusqu'à ce qu'une variation de courant photovoltaïque (ΔIpv) soit détectée, ce qui indique un changement de conditions climatiques et nécessite de rechercher un nouveau PPM. Pour ce faire, l'algorithme ajuste la valeur de « Vref » soit en l'augmentant, soit en la diminuant, jusqu'à ce que le PPM soit atteint.

Avec la méthode de contrôle « Inc-Cond », il est possible de trouver et de fixer un PPM en arrêtant la perturbation. Dans ce cas, la variation de la tension photovoltaïque (ΔVpv) est

nulle, et le contrôle repose sur la détection de la variation de courant photovoltaïque (ΔI_{pv}) pour réactiver l'ajustement de la valeur de « V_{ref} » afin d'atteindre un nouveau PPM. Cela se produit par exemple lors de changements de luminosité. Cette méthode présente une propriété intéressante en régime établi, car il n'y a pas de pertes par rapport au PPM. De plus, cette méthode ne présente pas de risques de divergence par rapport au PPM, contrairement aux deux méthodes de MPPT précédentes. [37].

II.7.1.3. La méthode "Hill Climbing" :

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (II-22). La variable Slope $\frac{dp}{da}$ correspond à une variable qui prend le signe « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau, c'est ce qui symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance P_{pv_n} est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{n-1} .

En fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur Slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations.

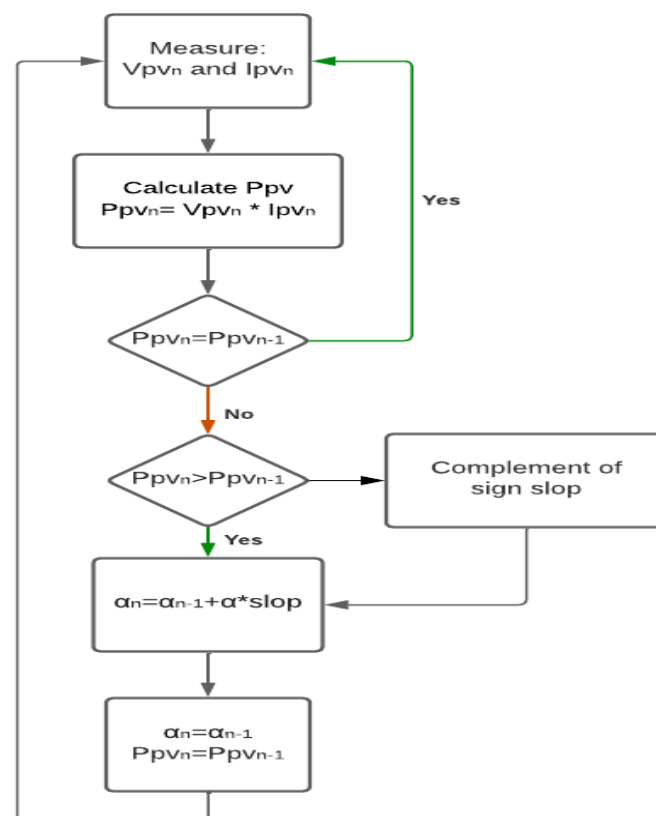


Figure II.22 : Algorithme type de la commande Hill Climbing.

Le schéma synoptique est illustré sur la figure (II-22), l'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède les mêmes inconvénients que la méthode P&O concernant les oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors du changement rapide des conditions climatiques [37].

II.7.2.MPPT Indirectes :

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{ppm} , I_{ppm}) et les paramètres caractéristiques du GPV, (V_{co} , I_{cc}) Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension .

II.7.2.1. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension (V_{co}) :

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{mpp} = k \times V_{co} \quad (\text{II.30})$$

Ou k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre (0,73 et 0,86) [46].

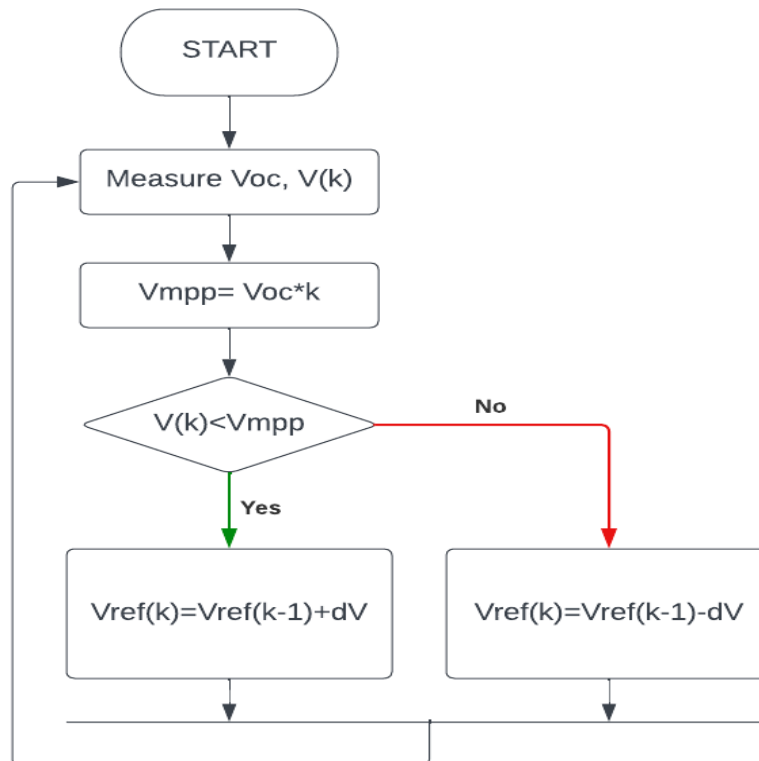


Figure II.23 : Organigramme de l'algorithme FCO.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [30].

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{co} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du GPV durant cette mesure, impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure. Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de k dans un GPV suivant les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance [37].

Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des GPV en silicium qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions essentielles à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents.

II.7.2.2. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant (I_{cc}) :

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$I_{mpp} = k \times I_{cc} \quad (II.31)$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre (0.78 et 0.92).

L'équation (II.31) montre que le courant optimal peut être déterminé par une mesure du courant du court-circuit et que le PPM peut être atteinte en appliquant un courant de référence

égal à I_{mpp} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure du courant de court-circuit implique une perte de transfert de puissance due à la mise en court-circuit du GPV.

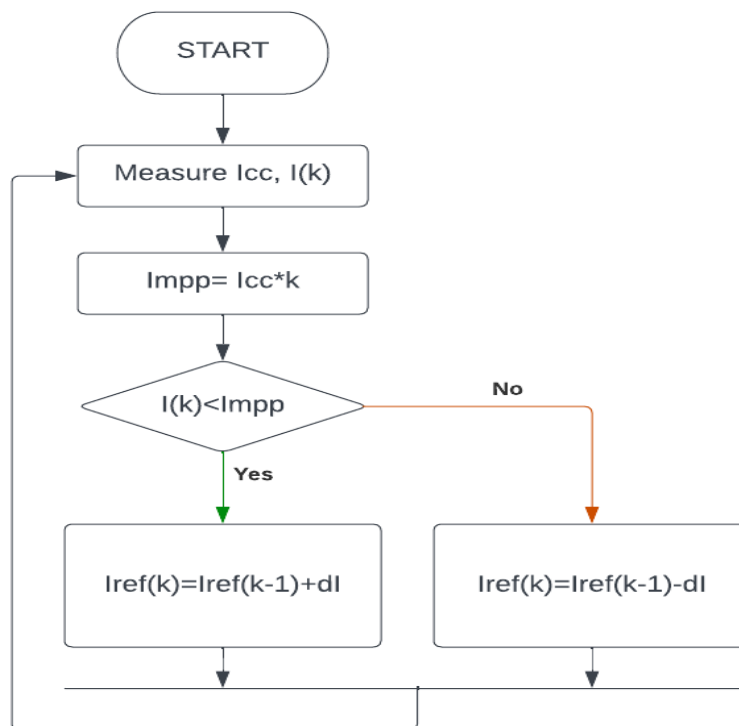


Figure II.24 : Organigramme de l'algorithme FCC [36].

Toutefois, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient. Ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années 80. Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteux que les commandes extrémales citées au début de ce document. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module (V_{co} , I_{cc}) qui ne peuvent pas se faire trop souvent.

L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée [37].

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la théorie et le fonctionnement d'un convertisseur statique DC-DC et présenté les types et leurs éléments et sont caractéristiques électrique.

Nous nous sommes spécialisés dans l'étude des convertisseurs statiques DC-DC uniquement parce qu'ils sont les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Puis on a cité et expliqué les différents types de la méthode de recherche du point de puissance maximal (MPPT) parmi ces méthodes la commande P&O et INC.

Dans le chapitre suivant on va étudier une simulation de perturbation et observation « P&O » et la méthode d'incrément de la conductance « INC » à l'aide de MATLAB SIMULINK, et à la fin on a réalisé une comparaison entre les deux méthodes. Noter que le type du convertisseur DC-DC utilisé dans la simulation est convertisseur BOOST.

Chapitre III :

Simulation et Résultats

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté par la commande numérique MPPT « Perturbation et observation, incrémentation de la conductance », et mener une étude et des tests de comparaison entre les deux commandes. Ce système est composé d'un module photovoltaïque et d'un convertisseur survolteur « boost », d'une commande MPPT « perturbation et contrôle ou surtension » et d'une charge.

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

III.2.Outille de MATLAB/SIMULINK :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

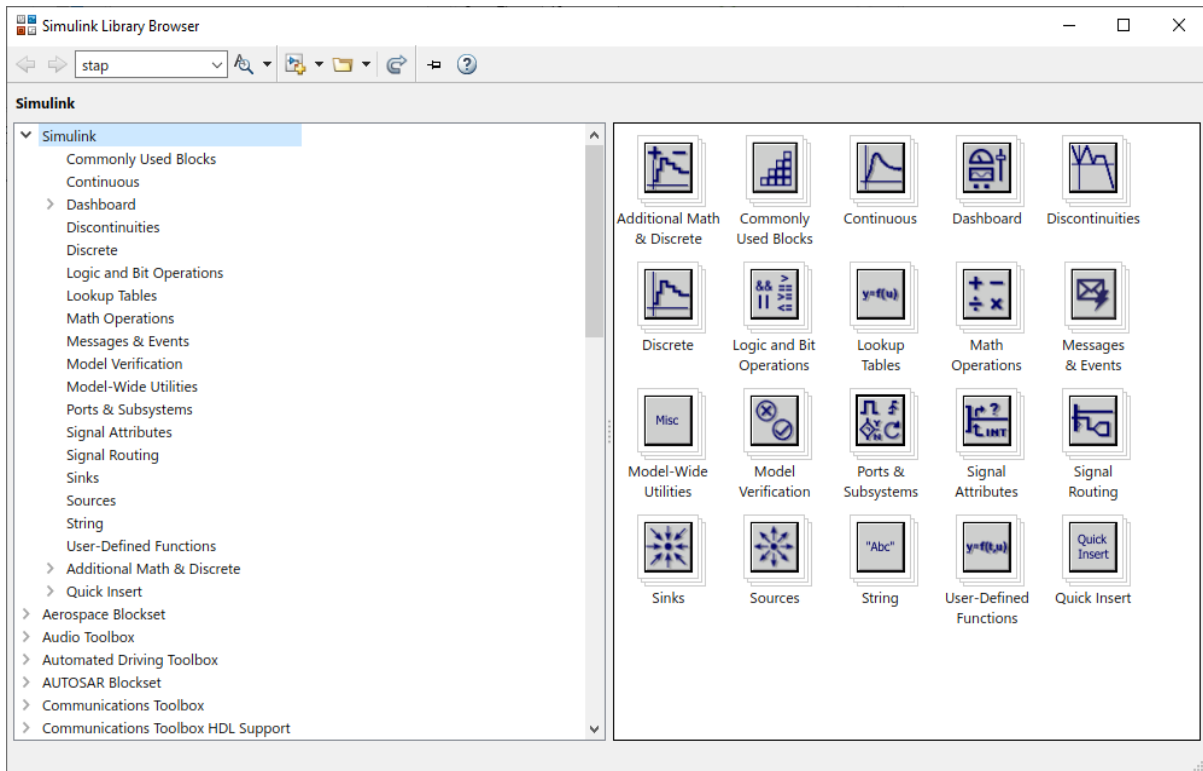


Figure III.1 : Bibliothèque de SIMULINK.

III.3.Simulation de Système :

III.3.1. Simulation de PV :

La simulation de PV qu'on a utilisé dans le premier chapitre. Il s'agit d'un module de 72 cellules de silicium polycristallin BP SX 150, d'une puissance maximale de 150 W. sa caractéristique dans le tableau (III.1) :

Module	1
Puissance maximale, Pmax (W)	150
Courant de court-circuit, sc I (A)	4.75
Tension de circuit ouvert, Vco (V)	43.5
Courant optimal à Pmax (A)	4.35
Tension optimale à Pmax (V)	34.5
Résistance série, Rs (Ω)	0.55
Résistance parallèle, Rp (Ω)	470

Tableau III.1 : Caractéristique du panneau utilisée.

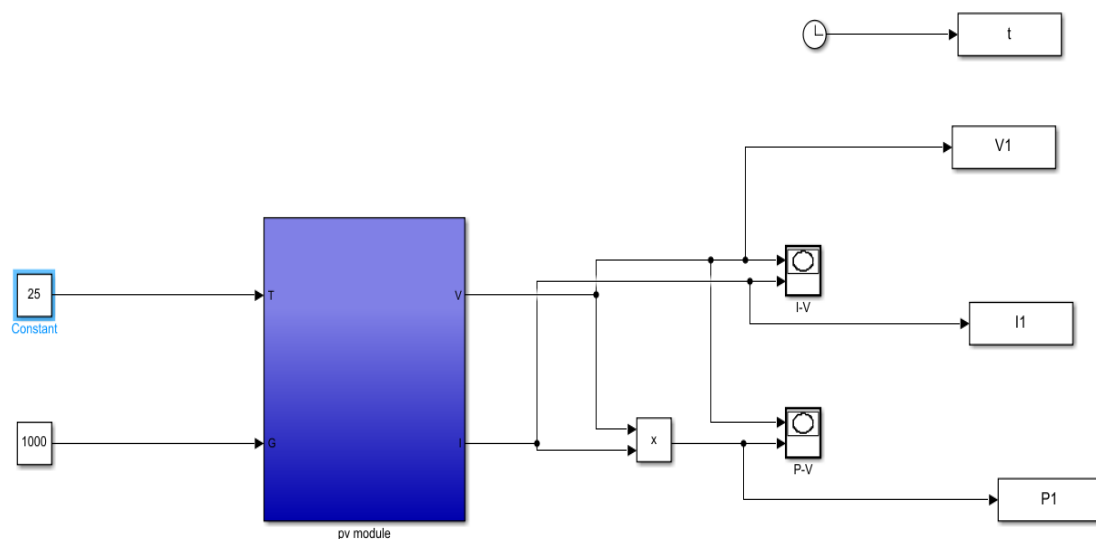


Figure III.2 : Modèle de panneau PV.

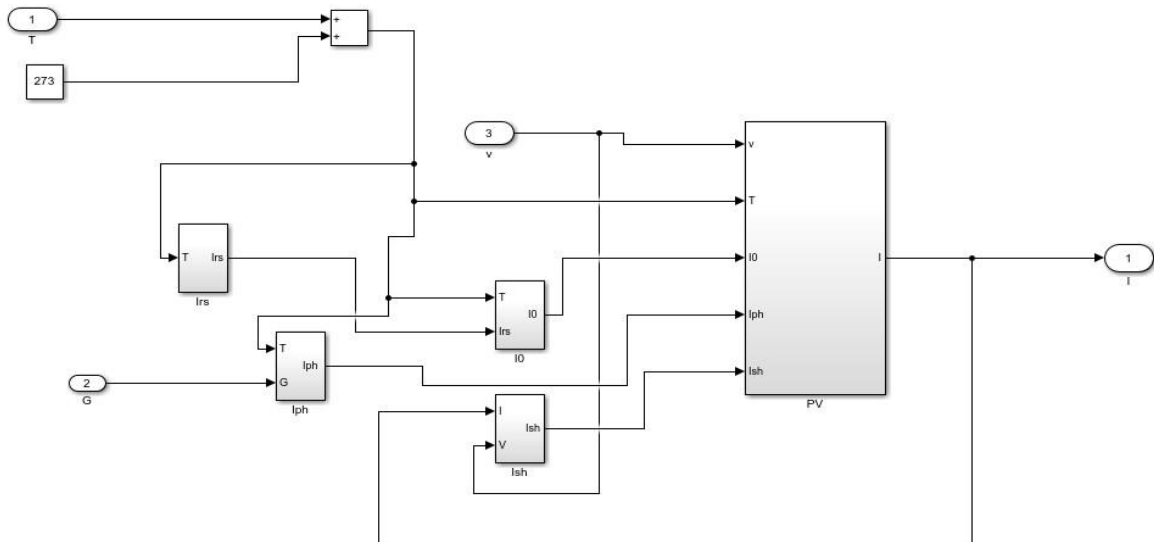


Figure III.3 : Modélisation sous MATLAB du panneau PV.

III.3.2. Simulation de convertisseur DC-DC Boost :

Pour une charge résistive (Load) de 100Ω avec une fréquence de commutation 5 KHz, $\Delta i_{max} = 0.5 A$ et $\Delta v_{max} = 5 V$, on a choisi les composants de convertisseurs types Boost comme présenter sur le tableau (III.2) :

Fréquence	5 KHz
R1	0.01 Ω
L	0.006 H
C1	10^{-3} F
C2	3×10^{-3} F
Charge (Load)	100 Ω

Tableau III.2 : Paramètres de simulation.

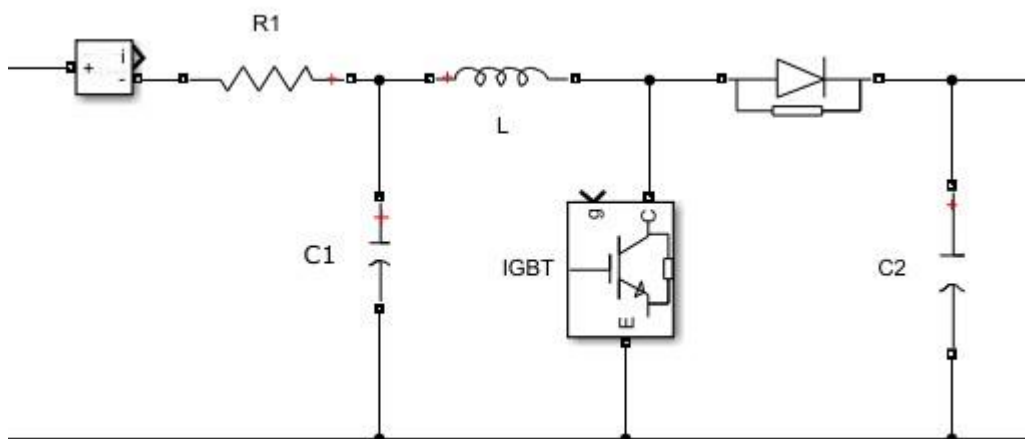


Figure III.4 : Modélisation de l'hacheur Boost.

Pour tester cette simulation on a appliqué un rapport cyclique sur la gachette de $D=0.8$ (80%) sur la diode IGBT de convertisseur DC-DC.

III.3.3. Les Algorithmes de MPPT étudié :

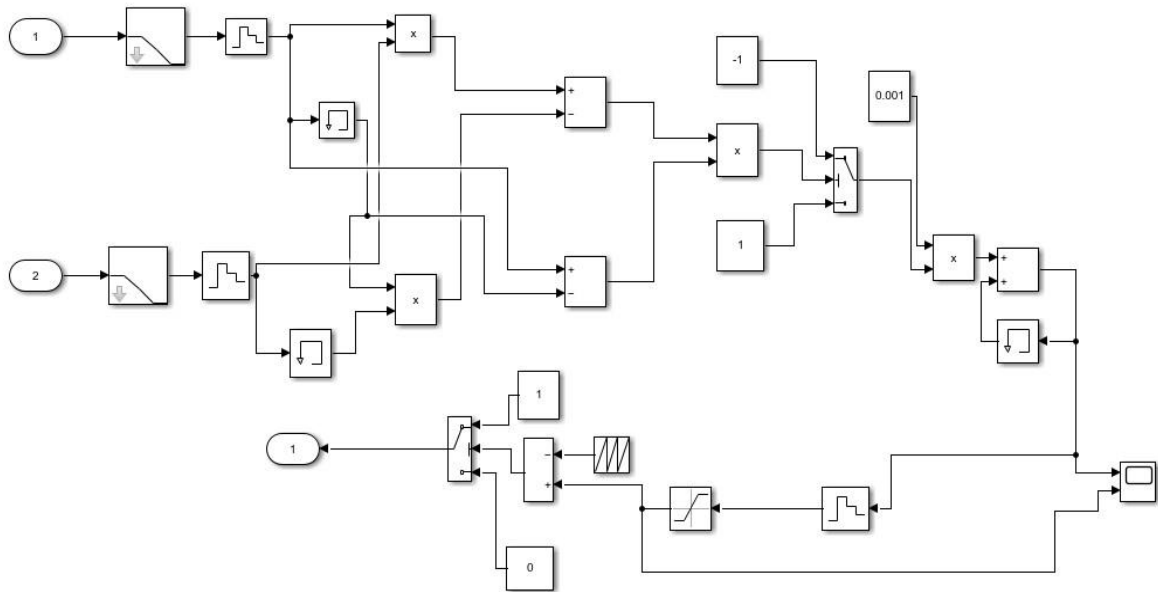


Figure III.5: Schéma block de la commande MPPT P&O.

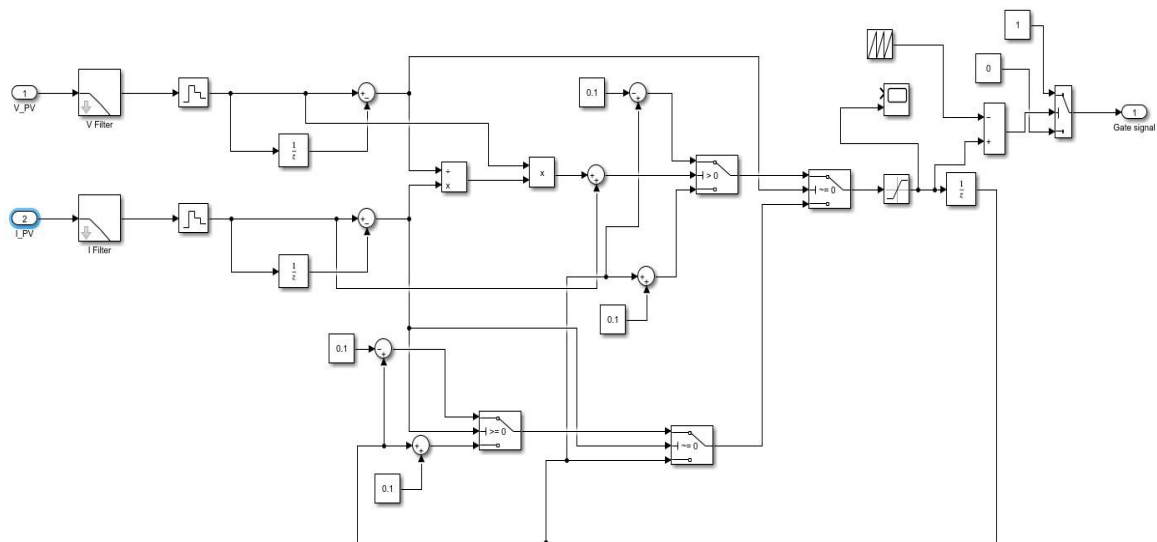


Figure III.6: Schéma block de la commande MPPT INC.

Notre système photovoltaïque étudié est de l'ensemble des niveaux simulés : PV, DC-DC et MPPT comme illustré dans la figure (III.) :

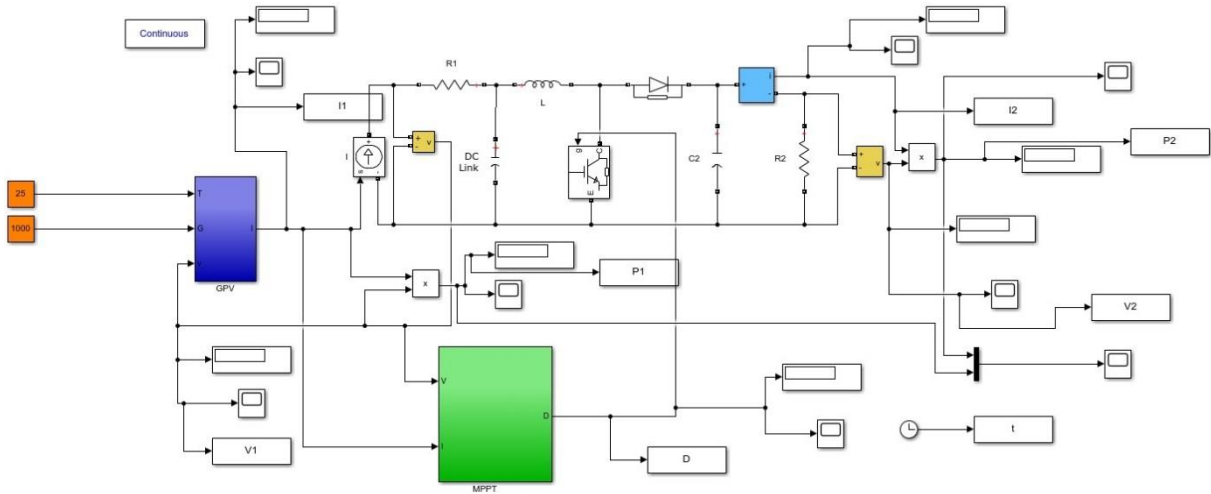


Figure III.7: Schéma globale de GPV et hacheur commandé par MPPT.

III.4. Résultats Et Discussion :

III.4.1. P&O :

III.4.1.1. Déférent éclairément :

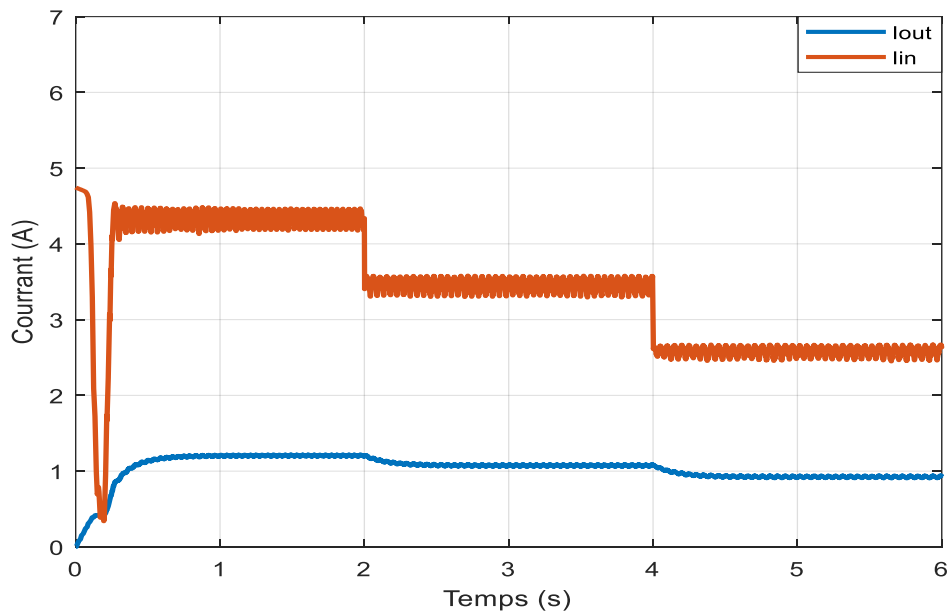


Figure III.8: Courbe de courant en fonction du temps avec variation d'éclairement (P&O).

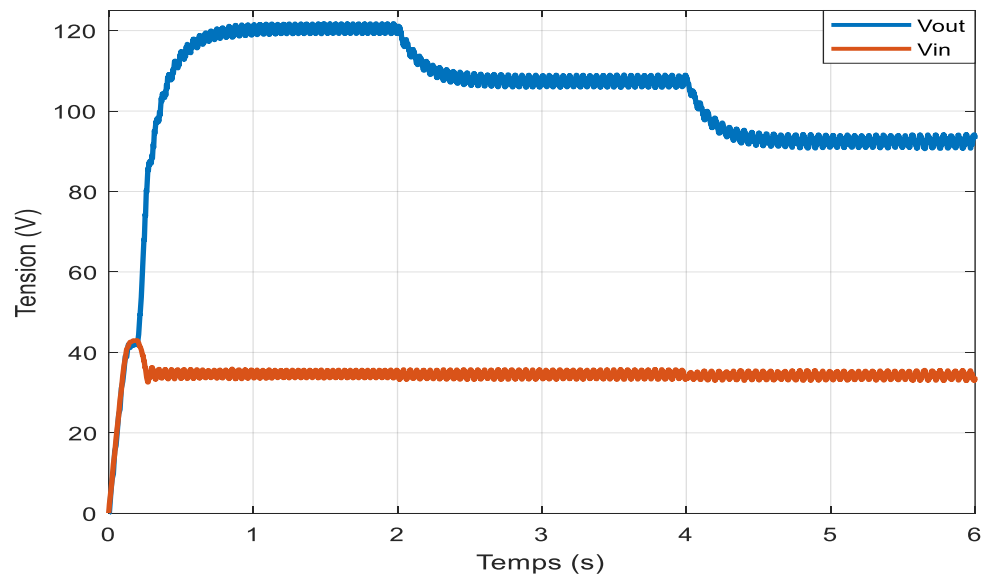


Figure III.9: Courbe de tension en fonction du temps avec variation d'éclairement (P&O).

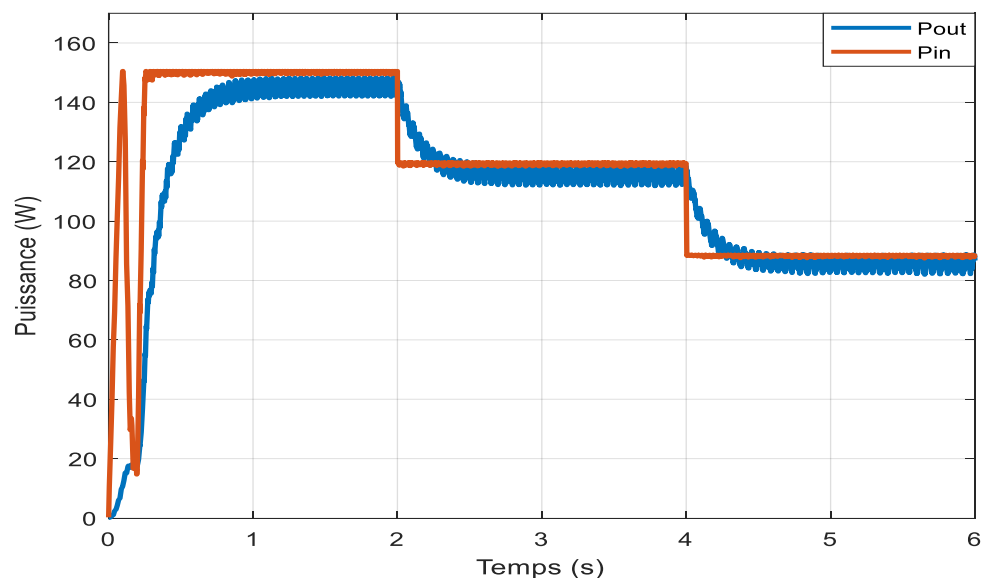


Figure III.10: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation d'éclairement (P&O).

On remarque que la puissance sortant varie proportionnellement lorsque l'ensoleillement change, et cette dernière effectue le courant du panneau et varie une variation importante, la tension de convertisseur à un éclairement spécifique (par exemple $1000\text{W}/\text{m}^2$) augmente à l'aide d'un taux de conversion commander par un rapport cyclique de MPPT P&O pour ajuster la tension est maintenir la puissance optimale.

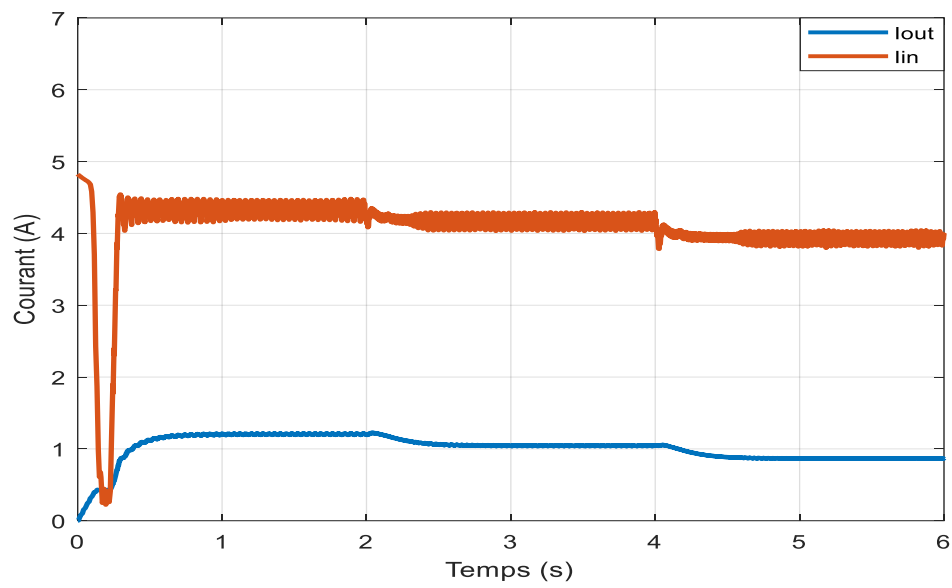
III.4.1.2. Déférent température :

Figure III.11: Courbe de courant en fonction du temps avec variation de température (P&O).

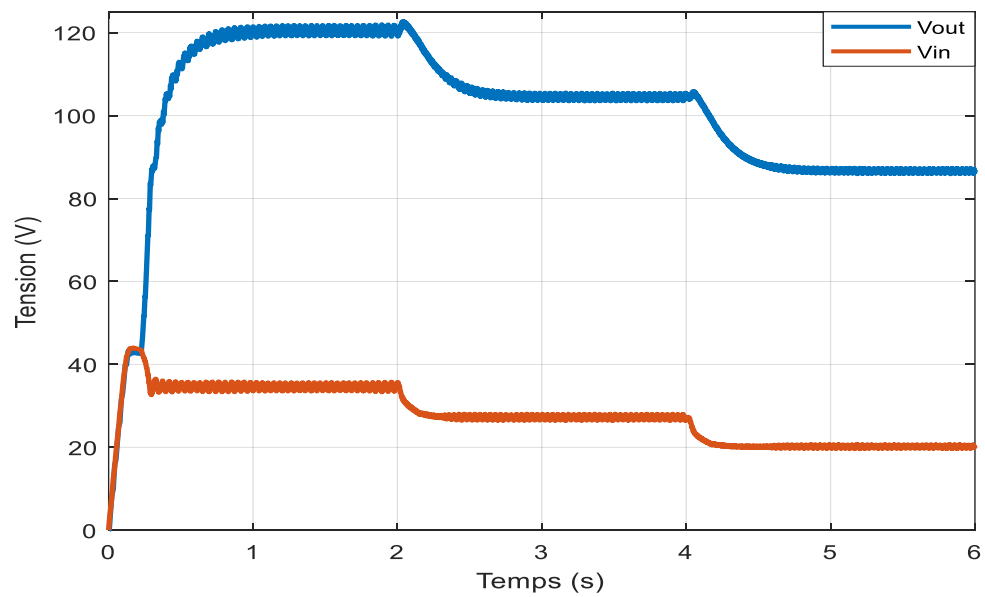


Figure III.12: Courbe de tension en fonction du temps avec variation de température (P&O).

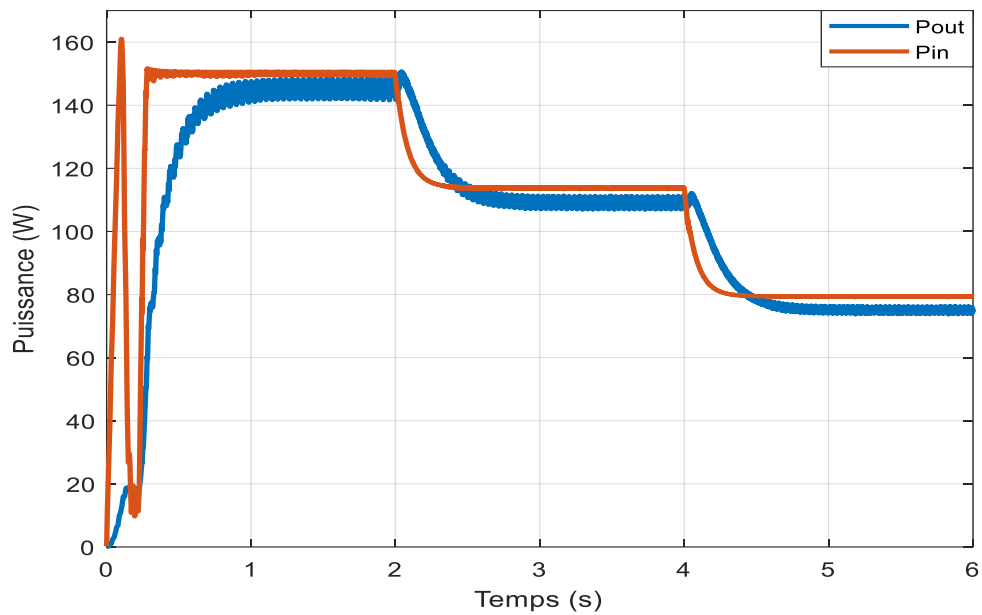


Figure III.13: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation de température (P&O).

On remarque que la puissance sortant varie proportionnellement lorsque la température change, et cette dernière effectuée la tension de circuit ouvert du panneau lourdement, on contraire de courant qui varie légèrement, avec l'ajustements de tension sortie par MPPT P&O pour une puissance maximale.

III.4.2. INC :

III.4.2.1. Déférent éclairément :

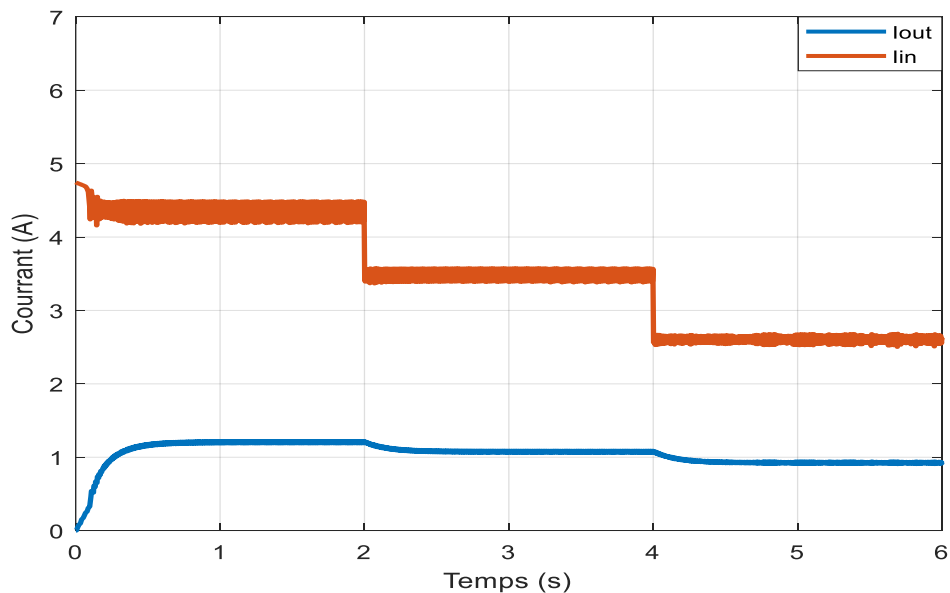


Figure III.14: Courbe de courant en fonction du temps avec variation de d'éclairément (INC).

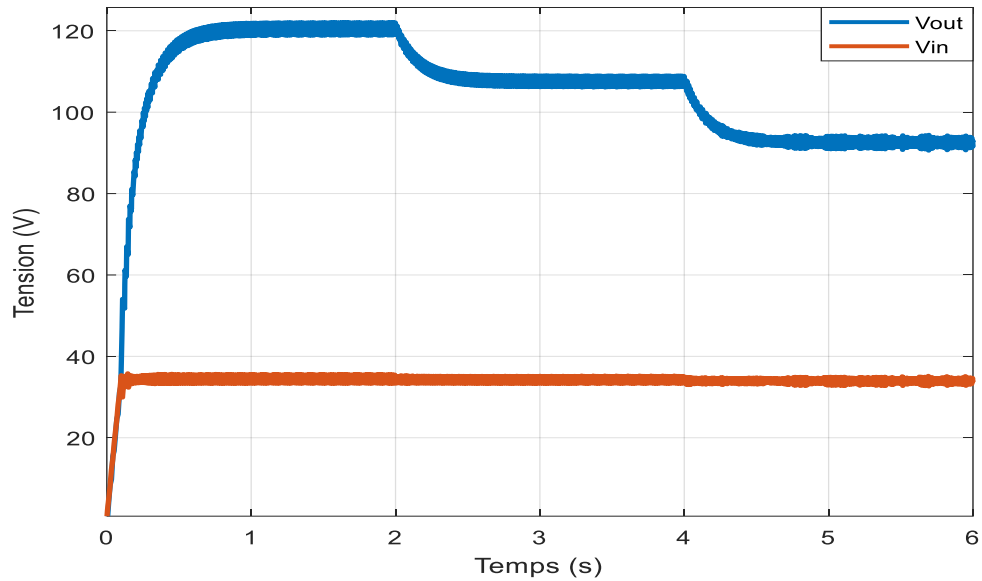


Figure III.15: Courbe de tension en fonction du temps avec variation de d'éclairement (INC).

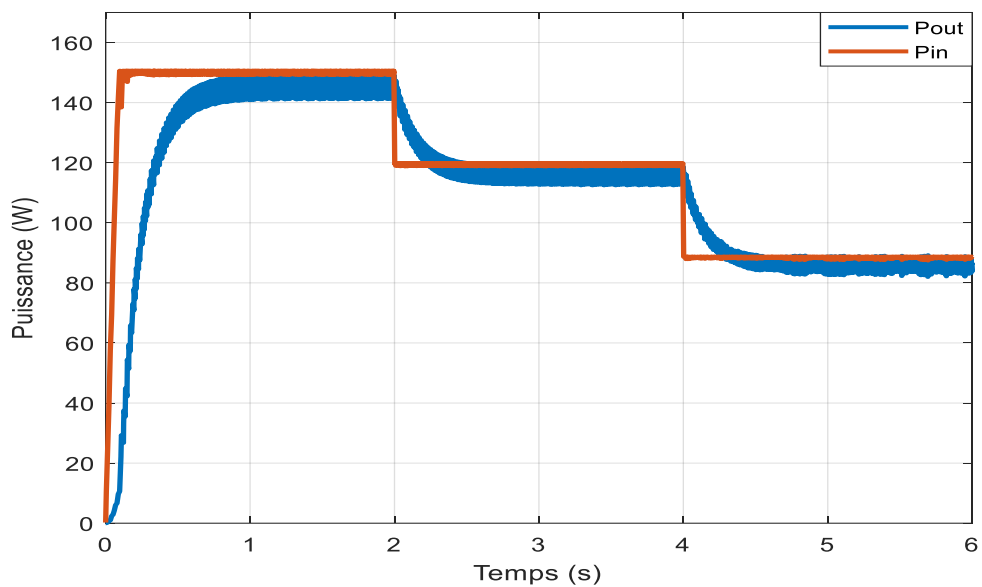


Figure III.16: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation de d'éclairement (INC).

On remarque que la puissance sortant varie proportionnellement lorsque l'ensoleillement change, et cette dernière effectuée le courant du panneau lourdement, la tension de convertisseur à un éclairement spécifique (par exemple $1000\text{W}/\text{m}^2$) augmente à l'aide d'un taux de conversion commander par un rapport cyclique de MPPT INC.

Le MPPT ajuste alors la tension et le courant de charge pour maintenir le système au point de puissance maximale, où l'efficacité de conversion d'énergie est optimale.

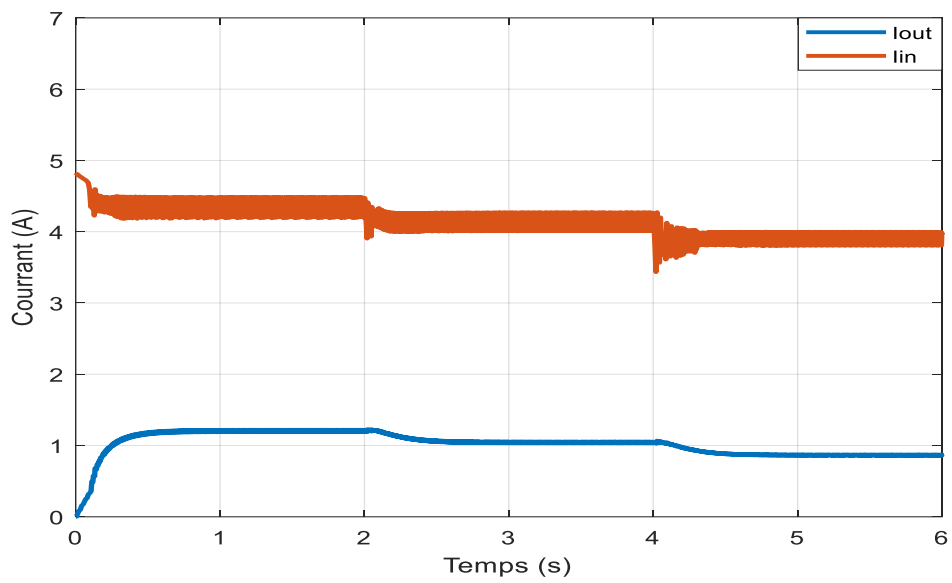
III.4.2.2. Déférent température :

Figure III.17: Courbe de courant en fonction du temps avec variation de température (INC).

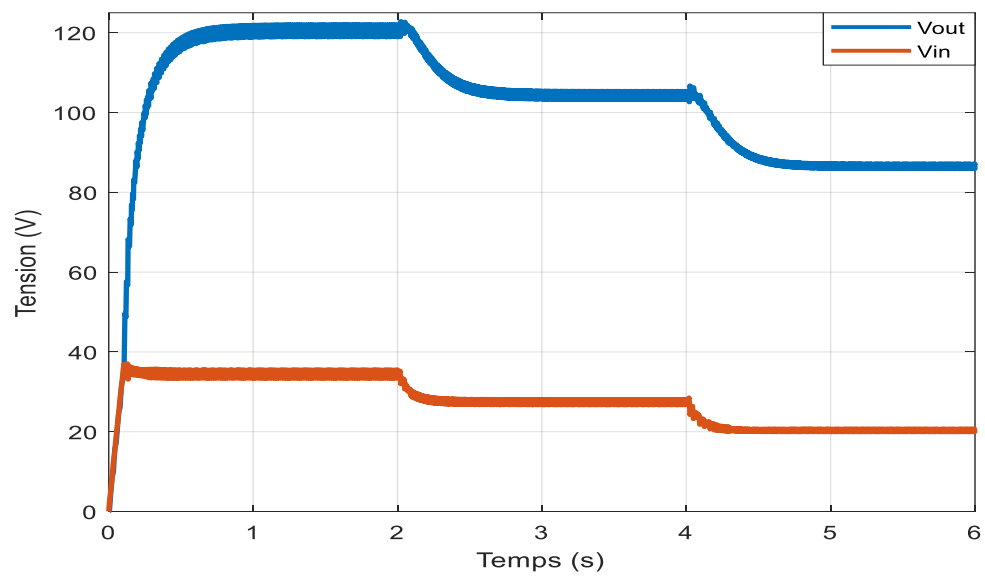


Figure III.18: Courbe de la tension en fonction du temps avec variation de température (INC).

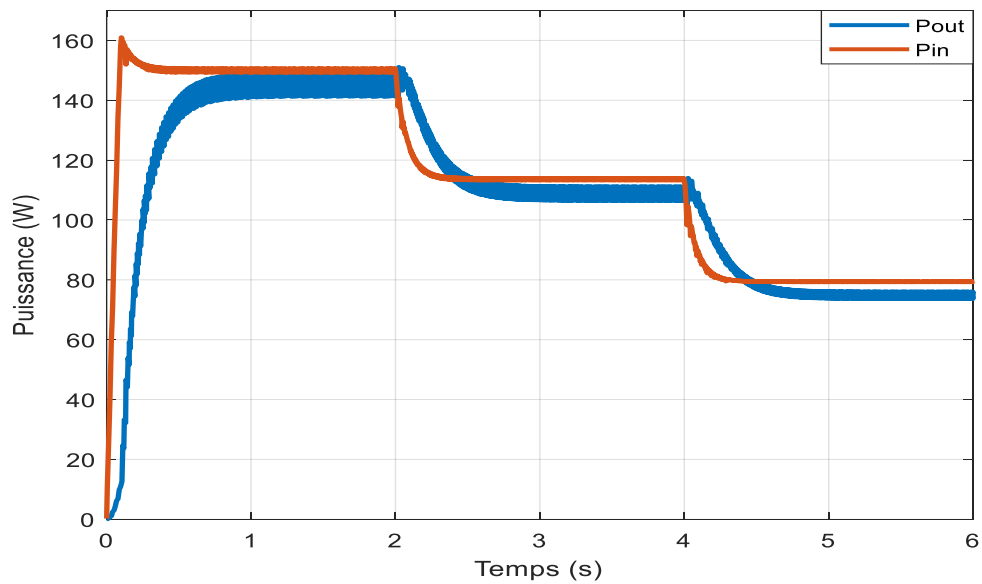


Figure III.19: Courbe de puissance en fonction du temps avec variation de température (INC).

Lorsque la température augmente, la puissance de sortie du système PV tend à diminuer (la température élevée augmente la résistance interne des cellules solaires, ce qui entraîne une perte de tension), et cette dernière effectue la tension de circuit ouvert du panneau lourdement, au contraire de courant qui varie légèrement.

Le MPPT INC-Cond, qui est un algorithme de commande, est conçu pour surveiller en permanence les conditions du système PV et ajuster les paramètres de charge pour maximiser la puissance de sortie. Lorsque la température augmente, le MPPT INC-Cond peut réagir en ajustant les paramètres de charge pour compenser la diminution de la puissance.

III.5. Comparaison Entre INC Et P&O :

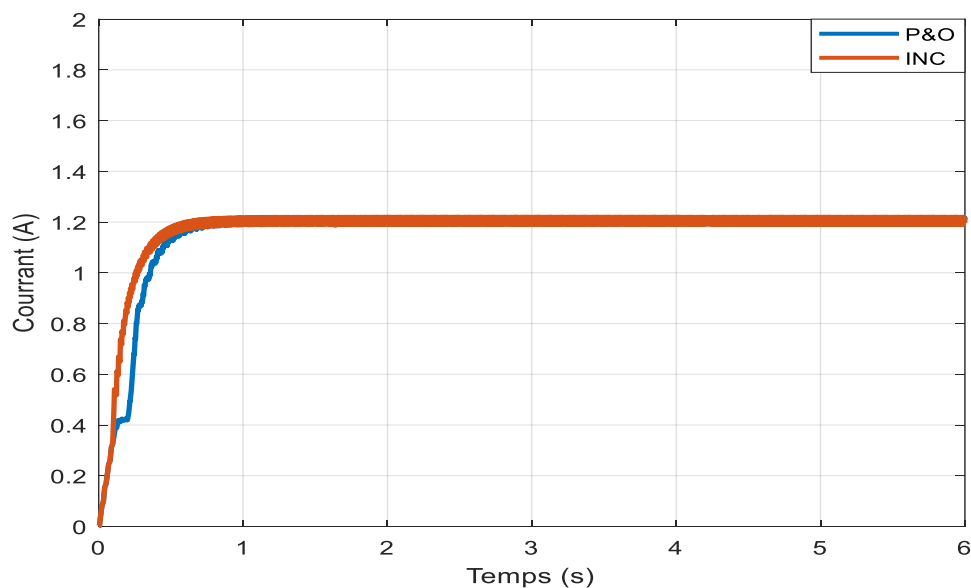


Figure III.20: Allure de comparaison du courant de sortie entre P&O et INC.

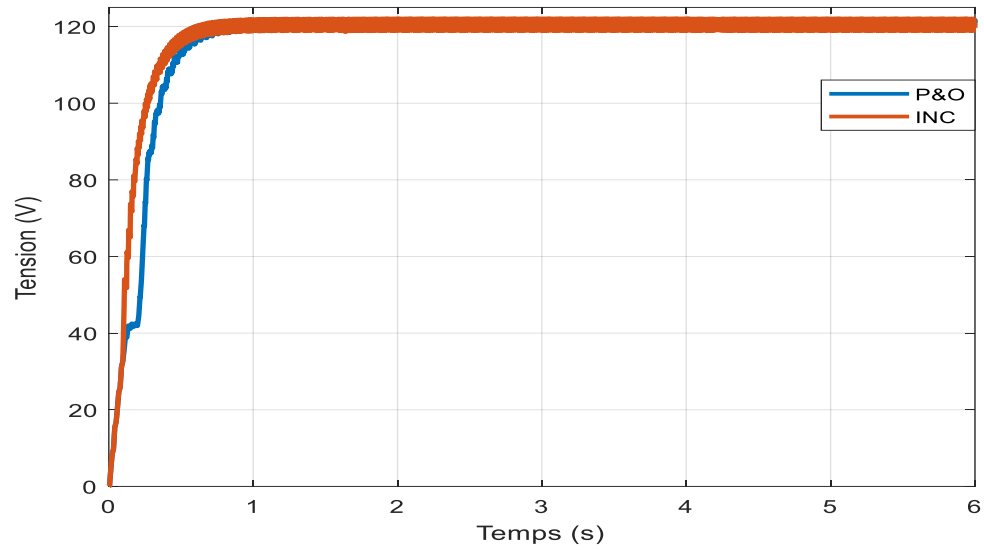


Figure III.21: Allure de comparaison du tension de sortie entre P&O et INC.

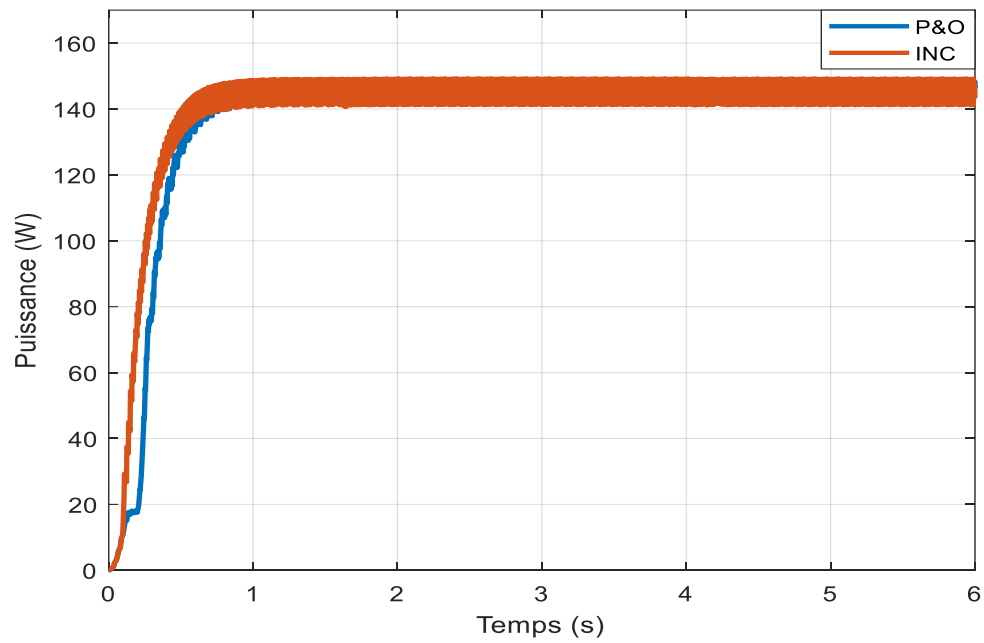


Figure III.22: Allure de comparaison du puissance de sortie entre P&O et INC.

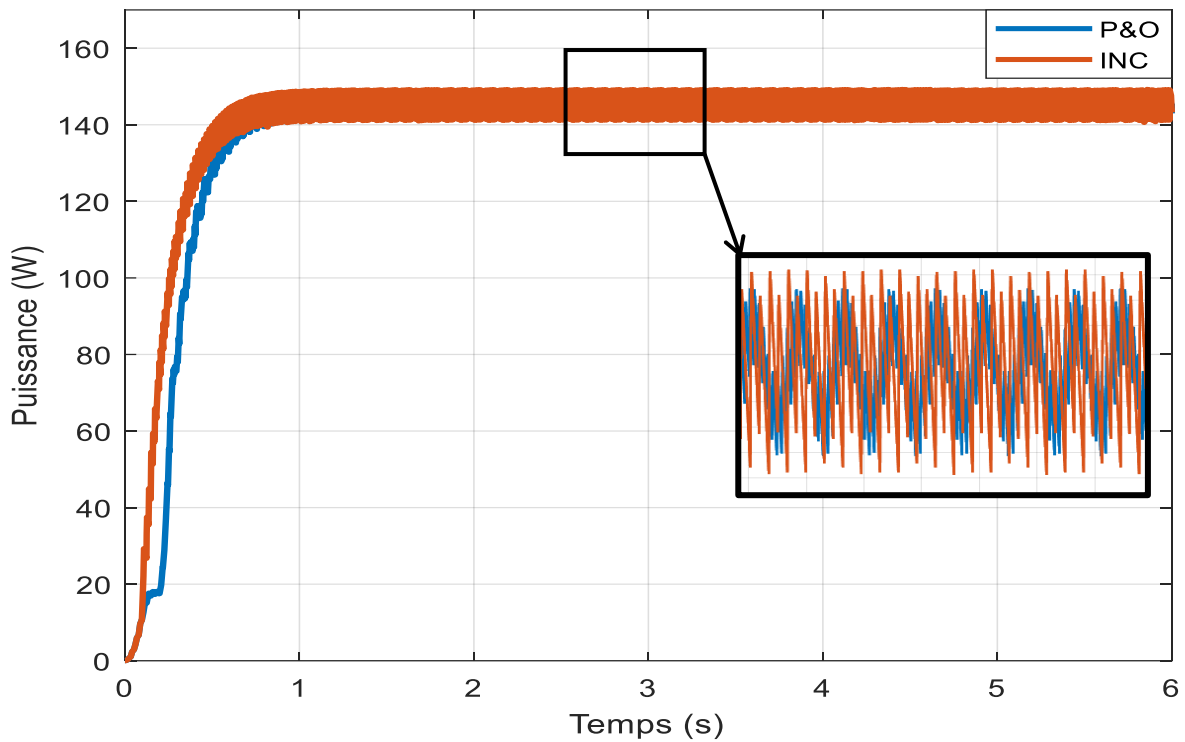


Figure III.23: Allure de comparaison du puissance de sortie entre P&O et INC.

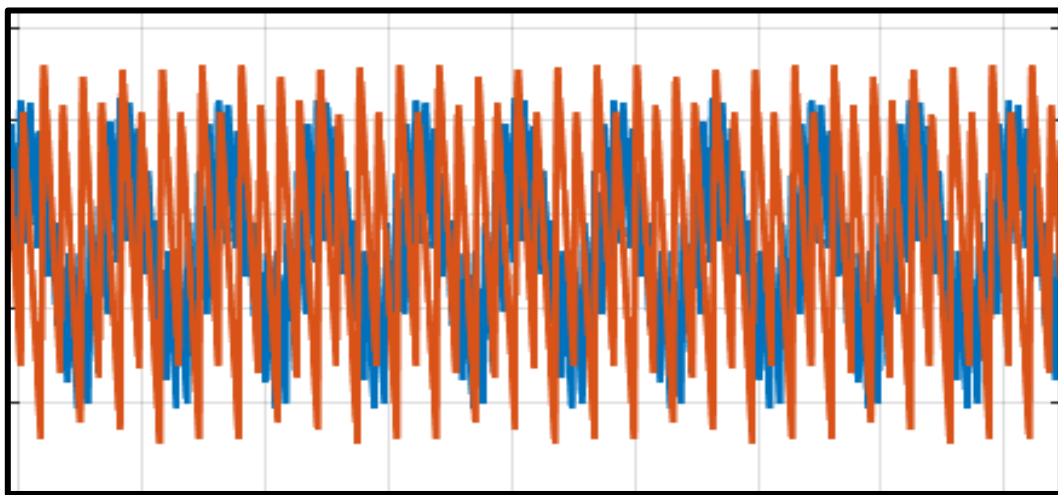


Figure III.24: Comparaison entre P&O et INC.

La recherche du point de puissance maximale par la méthode P&O présente certaines fluctuations qui retardent le système dans sa montée vers le point PPM.

Les résultats montrent nettement que la méthode d'incrémentation de la conductance accède le MPP avec peu de fluctuation au niveau de la puissance.

Signal de gâchette :

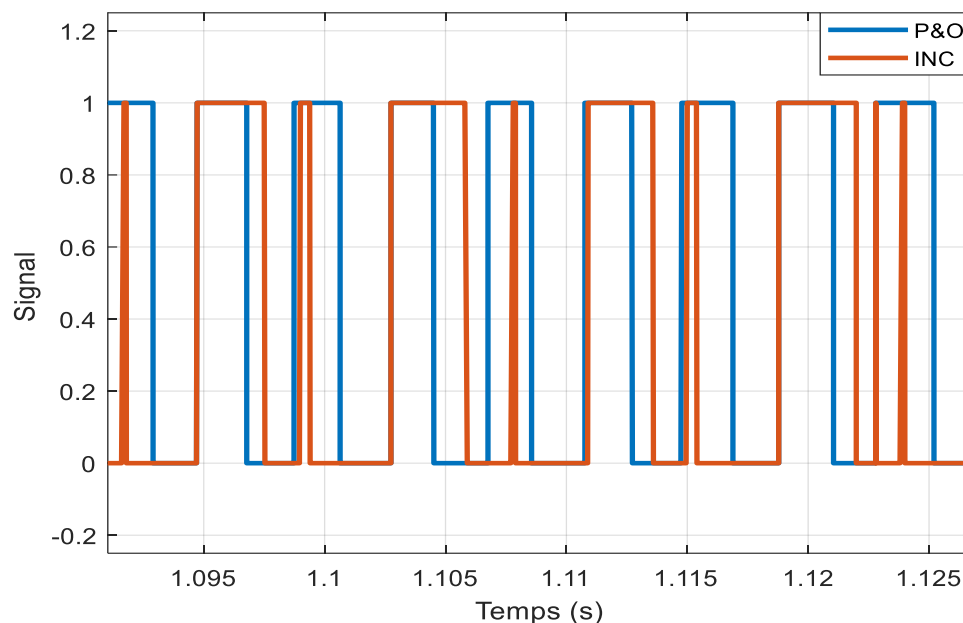


Figure III.25: Allure de comparaison de signal du gâchette entre P&O et INC.

D'après le signal de gâchette nous savons que le signal de MPPT P&O est retardé par rapport au signal de MPPT INC, cela est dû à la différence de principe de fonctionnement entre ces deux algorithmes de commande.

On peut résumer la comparaison entre les deux MPPT (P&O, INC) sous le tableau suivant :

Algorithmes MPPT	P&O	INC
Types des capteurs utilisés	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant
Complexité	Basse	Moyenne
Vitesse de convergence	Moyenne	Très rapide
Puissance (W) à 0.4s (rapidité)	113.2	126.75
Puissance Min (W) (Stabilité)	142	141.14
Temps de réponse (s) à 95% de puissance	0.55	0.65
η MPPT (%)	98.9 %	99.5 %
Erreur Statique %	1.66	0.75

Tableau III.3: Comparaison de deux techniques MPPT.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons brièvement exposé les principes de deux algorithmes MPPT plus populaires. Nous avons ensuite procédé à une simulation des divers algorithmes, dont les résultats indiquent que l'algorithme "INC" offre des meilleures performances avec un erreur très peu que l'algorithme "P&O".

Parmi tous les algorithmes étudiés, l'algorithme "P&O" est celui qui est le plus largement adopté.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette recherche, nous avons mené une étude basée sur l'analyse de la conception, la simulation et la modélisation d'un générateur photovoltaïque (PV) et nous présentons leur principe de fonctionnement électrique adapté par un dispositif de contrôle pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Après avoir rappelé les caractéristiques des panneaux photovoltaïques et l'impact du climat sur ceux-ci, nous avons également abordé le fonctionnement du convertisseur, dont ses types diffèrent selon le besoin dans le domaine de la production d'énergie. Nous avons fait une inspection approfondie sur les différents types de recherche de la MPPT rencontrés dans la littérature. Les performances d'un régulateur de point de puissance maximale (MPPT) sont évaluées en fonction de divers critères pertinents. La vitesse de recouvrement de PPM ainsi que le temps de réponse sont des facteurs essentiels à prendre en compte lors du choix d'un MPPT. De plus, il est observé que la complexité de l'algorithme a un impact direct sur le coût de la commande.

Généralement, nous connectons un convertisseur DC-DC entre le générateur photovoltaïque et la charge, et la commande MPPT soit P&O classique ou INC-Cond classique est connectée directement avec le convertisseur pour contrôler la tension de référence et la fournit au convertisseur, dont la commande force le système de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT INC-Cond conduit à des meilleures performances.

On conclut aussi que :

- Les performances du panneau photovoltaïque se dégradent selon l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'ensoleillement (éclairage).
- Le convertisseur DC-DC BOOST est un convertisseur survolteur qui permet de fournir une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV.
- Le régulateur MPPT ajuste le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque en fonction des besoins de la charge.
- La technique MPPT utilisant l'algorithme "Incrément de Conductance" parvient rapidement à atteindre le point de puissance maximale (PPM) avec des oscillations négligeables.
- La tension de sortie change en raison de la valeur du rapport cyclique de MPPT.

Notre objectif avec ce travail est de contribuer à l'étude approfondie des caractéristiques photovoltaïques des cellules solaires, de l'analyse des systèmes photovoltaïques et des techniques de commande MPPT (P&O, INC-Cond). Nous cherchons à apporter de nouvelles connaissances et perspectives dans ces domaines afin de favoriser le développement et l'optimisation des systèmes solaires, où est notre perspective future de faire une étude comparative entre les algorithmes P&O et INC modifié avec l'intégration de l'intelligence artificielle.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bp Statistical Review Of World Energy 2021 : Les Chiffres Clés De L'énergie Dans Le Monde | Connaissances Des Energies (Connaissancedesenergies.Org)
- [2] Energies Renouvelables | Chiffres Clés De L'énergie - Edition 2021 (Developpement-Durable.Gouv.Fr)
- [3] https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Rapport_Cerefe_Te-2020-4.
- [4] <https://fr.statista.com/statistiques>
- [5] Zaghba Layachi « Etude Et Commande Adaptative Par Les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non Linéaires Application Aux Systèmes Photovoltaïques », Mémoire De Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017
- [6] <https://www.energy.gov.dz/?Rubrique=Energies-Nouvelles-Renouvelables-Et-Maitrise-De-Lrenergie>
- [7] Lamara Mohamed « Etude Comparative Des Algorithmes P&O Et Inc-Cond Pour L'optimisation D'un Système Photovoltaïque (Pv) Autonome », Mémoire De Master Académique Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2022
- [8] El Bahammaoui, M. & Masmoudi, R. « Commande Mppt De Pas Variable Pour Améliorer Les Performances Des Systèmes Pv Statiques Et Dynamiques », Mémoire De Master, Université Ahmed Draia-Adrar, 2020
- [9] Oukaf, A., & Bellal, A. « Amélioration De La Commande Mppt D'un Système Photovoltaïque Par Les Techniques Intelligentes » Mémoire De Master Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2021
- [10] Behir Boubaker « Optimisation D'un Système Photovoltaïque Adapté Par Une Commande Mppt Floue », Mémoire De Master Académique L'université Echahid Hamma Lakhdar D'el Oued, 2019
- [11] <https://www.solar-energy-connection.com/direct-scattered-and-total-solar-radiation-and-instrumental-measurement.html>
- [12] Degla Mohammed Larbi « Dimensionnement D'un Système De Pompage Photovoltaïque Mémoire » Master Professionnel Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [13] Bougherara, S., & Chebira, S. « Synthèse D'une Loi De Commande Du Mppt Pour Un Système De Conversion A Un Seul Etage », Mémoire De Master Higher School In Applied Sciences Tlemcen, 2022
- [14] Houdheyfa, R. O. U. B. I., & Hichem, A. I. B. « Amélioration De La Commande Mppt D'un Système Photovoltaïque Par Backstepping », Mémoire De Master Académique Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2019

Références bibliographiques

- [15] Tommy Andy, Theubou Tameghe, « Contribution A La Mise En Œuvre Et A La Commande D'un Microréseau De Cogénération Modulaire », Mémoire De Doctorat, Université Du Québec A Chicoutimi, 2019
- [16] Hakoumi Ahmed « Commande Mppt Et Contrôle D'un Systeme Photovoltaïque 3kw Par La Logique Floue », *Mémoire De Master* Université Ahmed Draia Adrar, 2019
- [17] <https://www.archiexpo.fr/prod/jinko-solar/product-68245-1501153.html>
- [18] <https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-polycristallin-2/>
- [19] <https://www.lepanneausolaire.net/la-fabrication-cellules-photovoltaïques.php>
- [20] Ouchefoune Abderraouf, Hamdani Omar, « Comparaison Des Différentes Techniques De Poursuites De Point De Puissance Maximale (Mppt) Dans Une Chaîne De Conversion D'énergie Photovoltaïques », Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2020
- [21] Aouchiche Nedjma « Conception D'une Commande Mppt Optimale A Base D'intelligence Artificielle D'un Système Photovoltaïque ». These De Doctorat De L'établissement Université Bourgogne Franche-Comte Préparée A Université De Technologie De Belfort-Montbéliard, 2020
- [22] https://www.researchgate.net/figure/Photovoltaic-System-Samlex-Solar_Fig2_344695627
- [23] Melle Boursali Wassila « Modélisation Et Simulation De L'influence De La Résistance Série Sur Les Caractéristiques I(V) P(V) D'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire De Master En Physique, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, 2017
- [24] Lahreche Imen « Mesure Des Propriétés Externes D'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire De Master Intitulé, Université Med Khider Biskra, 2013
- [25] Helali Kamelia « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative », Mémoire De Magister En Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2012
- [26] Melle. Harbit Assia-Sarah « Etude Comparative Entre Deux Algorithmes Mppt Basés Sur La Méthode P&O Et Mode Glissant Pour Les Systèmes Photovoltaïques », Mémoire De Master Académique, Université Saàd Dahlab Blida-1, 2020
- [27] Hamouche Newfel, Raghdadi Imed « Etude Comparative Des Différentes Techniques Mppt Dans Un Systeme Pv », Mémoire De Master Intitulé, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019
- [28] <https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>

Références bibliographiques

- [29] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid, « Etude Comparative De Cinq Algorithmes De Commande Mppt Pour Un Système Photovoltaïque », Conférence Internationale Des Energies Renouvelables (Cier'13), Sousse, Tunisie - 2013
- [30] C. Cabal, „Optimisation Energétique De L'Étage D'Adaptation Electronique Dédié A La Conversion Photovoltaïque“, Thèse De Doctorat, Laas, Université De Toulouse, 20
- [31] G. Escobar, S. Pettersson, C.N.M. Ho, M. Karppanen, T. Pulli, « Pv Current Sensorless Mppt For A Single-Phase Pv Inverter », 37th Annual Conference On Ieee Industrial Electronics Society Iecon, 2011, Pp. 3906 – 3911.
- [32] Touama Tariq, « Commande D'une Mppt Avec Un Convertisseur Dc/Dc Pour Un Système Photovoltaïque », Master Académique En Electronique, Université Mohammed Boudiaf M'sila 2019.
- [33] Mr : Belkaid Abdelhakimr, Conception Et Implémentation D'une Commande Mppt De Haute Performance Pour Une Chaîne De Conversion Photovoltaïque Autonome, Doctorat En Sciences:Université Ferhat Abbes - Sétif, 2015.
- [34] Chekkaf Ikram, « Etude Et Modélisation Des Hacheurs Boost Multi-Niveaux Dédient Aux Systèmes Photovoltaïques », Ecole Supérieure En Sciences Appliquées Tlemcen, 2019.
- [35] Achour Abderraouf, Analyse Et Commande D 'Un Hacheur Buck- Boost, Mémoire De Master:Université Mohamed Khider De Biskra, 2018.
- [36] Hakoumi Ahmed, Benamar Abdeldjalil, Commande Mppt Et Contrôle D'un Système Photovoltaïque 3kw Par Logique Floue Mémoire De Fin Etude Master En Electrotechnique, Université Ahmed Draia Adrar 2018/2019.
- [37] Babaci Hanane Et Benkhedda Issad, « Etude Comparative Entre Les Différents Mppt's Photovoltaïques », Master Académique En Microélectronique Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou
- [38] A.Aziz, K.Kassmi, F. Olivier, G.Sarrabayrouse, A.Martinez «Analyse Dans L'environnement Orcad-Pspice L'adaptation Dc-Dc Des Systèmes Pv Par Des Convertisseurs Boost Fonctionnant A Haute Fréquence » Rapport Laas /Cnrs N° 05267,19p Toulouse-France, Juin 2005.
- [39] M .F. Shraif « Optimisation Et Mesure De Chaines De Conversion D'énergie Photovoltaïque Energie Electrique » Thèse De L'université Paul Sabatier, Laas/Cnrs 2002.
- [40] Alain Bilbao Learreta « Réalisation D'une Commande Mppt Numérique » Laas /Cnrs.
- [41] M.Bedrane Farid. Etude Comparative Entre Quelques Méthodes De Poursuite Du Point De Puissance Maximale Dans Les Systèmes Photovoltaïques, University Abdurrahman Mira De Bejaia

Références bibliographiques

- [42] Hajar Bagheri “Advances In Electric Power Engineering” Publisher: Lulu (Usa), 2015
- [43] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi ,,,“Active Power Control For A Single-Phase Grid Connected Pv System”, International Journal Of Scientific & Technology Research Vol 2, Issue 3, 2013.
- [44] Ahmad Zbeeb, “A New Microcontroller-Based Mppt Algorithm For Photovoltaic Applications” For The Degree Of Master Of Applied Science, Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 2009.
- [45] Hakoumi Ahmed, Benamar Abdeldjalil, Commande Mppt Et Contrôle D’un Système Photovoltaïque 3kw Par Logique Floue Mémoire De Fin Etude Master En Electrotechnique, Université Ahmed Draia Adrar 2018/2019.
- [46] D.Sera , T.Kerekes, R.Teodorescu, F.Blaadjerg, “Improved Mppt Algorithmes For Rapidly Changing Environmental Conditions“, Communication And Information Technologies,Isctit“ 06, 215, Sept 2006.

Annexes

Annexe A : datasheet du panneau PV BP SX 150 :



BP SX 150

150-Watt Multicrystalline Photovoltaic Module

BP Solar's SX series provides cost-effective photovoltaic power for general use, operating DC loads directly or, in an inverter-equipped system, AC loads. The SX 150 is one of the largest products in this series, providing 150 watts of nominal maximum power. With 72 cells in series, it charges 24V batteries (or multiples of 24V) efficiently in virtually any climate. It is used primarily in utility grid-supplemental systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Electrical output is via cables terminated with installation-speeding polarized connectors.

This product is available as the SX 150S module, with a clear anodized frame; and as a frameless laminate, the SX 150L.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of SX 150 construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells in series;
- Polarized weatherproof DC-rated plug-and-socket connectors provide reliable low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation;
- SX 150S frame strength exceeds requirements of certifying agencies;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass.



DC Connectors

Limited Warranties

- Power output for 20 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 2 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.



Clear-Anodized Universal Frame

Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- SX 150S is listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- SX 150S is certified by TÜV Rheinland as Class II equipment and for use in systems with voltage up to 1000 VDC;
- SX 150S complies with the requirements of IEC 61215, including:
 - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
 - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
 - 2200 VDC frame/cell string isolation test;
 - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).



BP SX 150S



Mechanical Characteristics

Weight

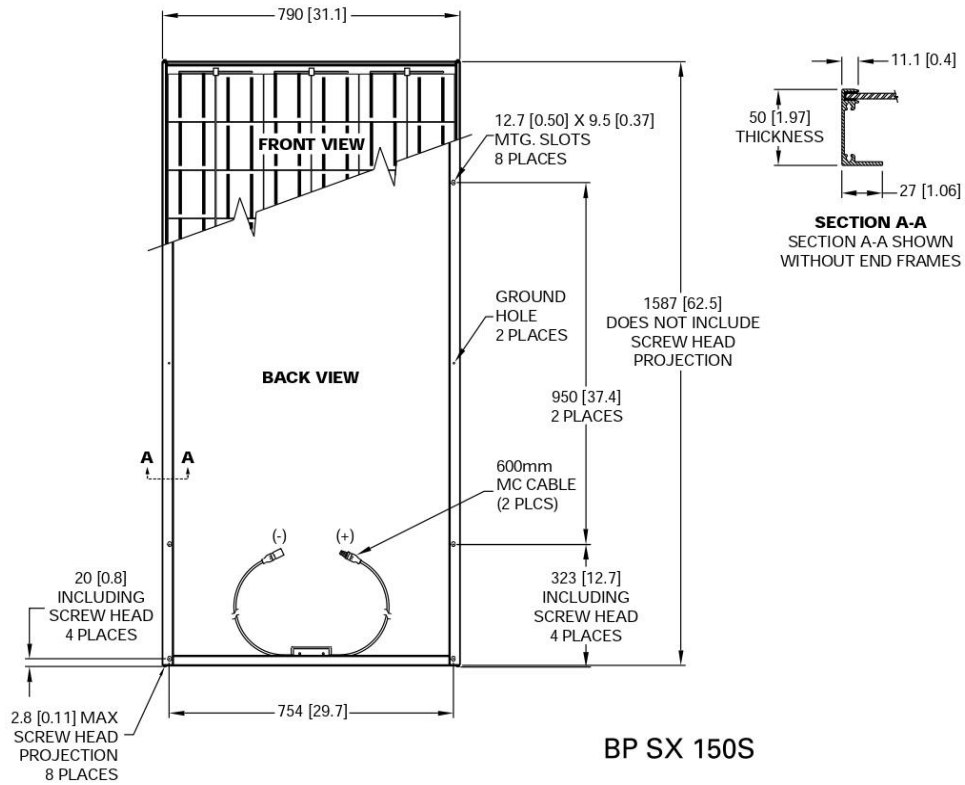
SX 150S 15.0 kg (33.1 pounds)
 SX 150L 12.4 kg (27.3 pounds)

Dimensions

SX 150S: See drawing
 SX 150L: 1580(62.2) x 783(30.8) x 19(0.75)
 Dimensions in brackets are in inches.
 Unbracketed dimensions are in millimeters
 Overall tolerances $\pm 3\text{mm}$ (1/8")

Output

600mm long RHW, AWG #12 (4mm²) 2-conductor
 cable with weatherproof polarized connectors



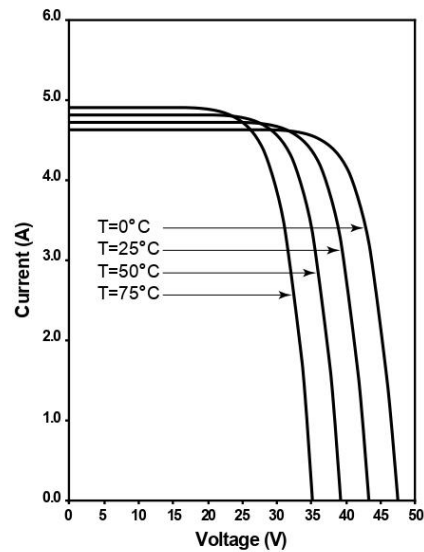
Electrical Characteristics¹

	SX 150	SX 140 ²
Maximum power (P_{max}) ³	150W	140W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	34.5V	34.0V
Current at P_{max} (I_{mp})	4.35A	4.11A
Warranted minimum P_{max}	140W	130W
Short-circuit current (I_{sc})	4.75A	4.5A
Open-circuit voltage (V_{oc})	43.5V	42.8V
Maximum system voltage ⁴	600V	
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	- (160±20)mV/°C	
Temperature coefficient of power	- (0.5±0.05)%/°C	
NOCT ⁵	47±2°C	

Notes

- These data represent the performance of typical SX 150 and SX 140 modules and laminates as measured at their output connectors. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
 - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
 - cell temperature of 25°C.
- The power of solar cells varies in the normal course of production; the SX 140 is assembled using cells of slightly lower power than the SX 150.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max} .
- U.S. NEC rating.
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1m/s.

BP SX 150 I-V Curves



Annexe B : Dimensionnement de convertisseur boost:

$$P_{pv} = 150w \quad V_{pv} = 34.5v \quad I_{pv} = I_l = 4.35A \quad V_s = 120v \quad P_s = 150w \quad \Delta V_s = 5V$$

$$\Delta I_l = 0.5A$$

$$F = 5000Hz$$

Valeur de l'inductance :

$$L \geq \frac{(D * V_{pv})}{V_s}$$

Courant de sortie :

$$I_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Valeur des condensateurs :

$$C_{in} \geq \frac{I_{ch} * D^2}{F * 0.02(-D) * V_{mp}}$$

$$C_{out} \geq \frac{V_{ch} * D}{F * \Delta V_{ch} * R_{ch}}$$

Rapport cyclique :

$$D = 1 - (V_{pv}/V_s)$$

Annexe C : Comparaison entre les convertisseur DC-DC:

1. Convertisseur Boost (élevateur) :
 - Avantages :
 - Permet d'augmenter la tension d'entrée à une tension de sortie supérieure.
 - Efficacité élevée dans la conversion de tension.
 - Peut fonctionner avec une tension d'entrée inférieure à la tension de sortie.
 - Limitations :
 - Ne peut pas abaisser la tension d'entrée.
 - La tension de sortie est généralement supérieure à la tension d'entrée.
 2. Convertisseur Buck (abaisseur) :
 - Avantages :
 - Permet de réduire la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure.
 - Efficacité élevée dans la conversion de tension.
 - Peut fonctionner avec une tension d'entrée supérieure à la tension de sortie.
 - Limitations :
 - Ne peut pas augmenter la tension d'entrée.
 - La tension de sortie est généralement inférieure à la tension d'entrée.
 3. Convertisseur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) :
 - Avantages :
 - Permet de réguler la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure ou supérieure, en fonction des besoins.
 - Efficacité élevée dans la conversion de tension.
 - Peut fonctionner avec une tension d'entrée supérieure ou inférieure à la tension de sortie.
 - Limitations :
 - Nécessite un circuit de commande plus complexe que le Buck ou le Boost.
 - Les transitions entre les modes abaisseur et élevateur peuvent introduire des perturbations transitoires.
- En termes d'applications:
- Le convertisseur Boost est couramment utilisé dans les applications nécessitant une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée, comme les écrans LCD, les lampes fluorescentes, etc.
 - Le convertisseur Buck est souvent utilisé pour réguler la tension d'alimentation des circuits électroniques, notamment dans les alimentations de cartes mères d'ordinateurs, les dispositifs portables, etc.
 - Le convertisseur Buck-Boost est utilisé lorsque la tension de sortie doit être régulée indépendamment des fluctuations de la tension d'entrée, comme dans les systèmes d'alimentation solaire, les véhicules électriques, etc.

Il est important de noter que les performances réelles et les avantages spécifiques peuvent varier en fonction de la conception et des spécifications du convertisseur DC-DC, ainsi que des conditions d'application.

Résumé

Summary:

The power generated by a photovoltaic (PV) generator depends on various factors such as solar radiation intensity, cell temperature, and other parameters. Due to the non-linear electrical characteristics of PV cells and their configurations, the performance of the system can be enhanced through the use of PV-based Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods. Two commonly employed MPPT techniques are the perturbation and observation (P&O) method and the Incremental Conductance (IncCond) technique. This thesis aims to conduct a comparative analysis of different MPPT techniques to assess and simulate the overall power of the PV system under different operating conditions. Mathematical models of the PV system components (GPV, DC-DC converter, load) were developed for this purpose. Simulation results obtained using the Matlab Simulink tool indicated that, overall, the IncCond technique outperforms the P&O MPPT controller.

Keywords: PV, Boost converter, MPPT command, Modelisation, Simulation

Resumé:

La puissance générée par un générateur photovoltaïque (PV) dépend de divers facteurs tels que l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules et d'autres paramètres. En raison des caractéristiques électriques non linéaires des cellules PV et de leurs configurations, les performances du système peuvent être améliorées grâce à l'utilisation de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basées sur PV. Deux techniques MPPT couramment utilisées sont la méthode de perturbation et observation (P&O) et la technique d'incrémentation de la conductance (IncCond). Cette thèse vise à réaliser une analyse comparative des différentes techniques MPPT pour évaluer et simuler la puissance globale du système PV dans différentes conditions de fonctionnement. Des modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur CC-CC, charge) ont été développés à cet effet. Les résultats de simulation obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink indiquent que, dans l'ensemble, la technique IncCond surpasse le contrôleur MPPT P&O.

Mots clés: PV, Convertisseur boost, Commande MPPT, Modélisation, Simulation.

التلخيص:

تعتمد الطاقة التي يولدها المولد الكهروضوئي (PV) على عوامل مختلفة مثل شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا والإعدادات الأخرى. نظرًا للخصائص الكهربائية غير الخطية للخلايا الكهروضوئية وتكويناتها، يمكن تحسين أداء النظام من خلال استخدام تقنيات تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة الكهروضوئية (MPPT). هناك طريقتان شائعتان في MPPT وهما طريقة Perturb and Observation (P&O) وتقنية التوصيل المتزايد (IncCond). تهدف هذه الأطروحة إلى إجراء تحليل مقارنة لتقنيات MPPT المختلفة لتقييم ومحاكاة الطاقة الكلية للنظام الكهروضوئي في ظل ظروف تشغيل مختلفة. تم تطوير النماذج الرياضية لمكونات النظام الكهروضوئية (GPV، محول DC-DC، الحمل) لهذا الغرض. تشير نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام أداة Matlab Simulink إلى أن تقنية IncCond تتفوق بشكل عام على وحدة تحكم MPPT P&O.

الكلمات المفتاحية: كهروضوئية، محول رافع للتوتر، تحكم MPPT، تصميم، محاكاة.